Journal of the Korea Convergence Society
Vol. 8. No. 5, pp. 185-192, 2017 https://doi.org/10.15207/JKCS.2017.8.5.185

공작기계 오차 요인의 분석 및 보정에 관한 연구

김기환[1], 윤재웅[2*]
[1]대구대학교 대학원 기계공학과, [2]대구대학교 기계공학부

A Study on the Analysis of Error Sources and Error Compensation in Machine Tools

Ki-Hwan Kim[1], Jae-Woong Youn[2*]
[1]Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Daegu University
[2]Division of Mechanical Engineering, Daegu University

요 약 공작기계의 오차는 크게 기하하적 오차, 열변형 오차 및 가공오차로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 2차원 가공에서, 각 오차의 원인이 전체 오차에 미치는 영향과 각 오차의 상대적 크기를 정량적으로 분석하였다. 오차의 상대적 크기는 열변형 오차와 가공오차가 상대적으로 기하학적 오차에 비해 크게 나타났으며, 이는 가공 정밀도에 직접적으로 관계된다고 판단되었다. 세 가지 오차를 제거하기 위해 측정된 오차 프로파일을 이용하여 오차의 보정 가능성을 검토하였다. 그 결과 각각의 오차요인에 대하여 약 50%의 시스템 오차를 보정할 수 있었으며, 특히, 열변형 오차와 가공오차의 경우 큰 폭으로 오차를 보정할 수 있음을 확인하였다. 본 연구를 통하여 가공에 관한 기본적인 데이터 베이스를 구축할 수 있으며, 이를 통해 사용자 관점에서 가공오차에 대한 보정이 가능할 것으로 기대된다.

• 주제어 : 기하학적 오차, 열변형 오차, 가공오차, 오차 보정, 공작기계

Abstract Machine tool errors can be divided into geometric error, thermal deformation error, and machining error. In this study, the influence of each error on the total error and the relative size of each error are quantitatively analyzed in 2D machining. The thermal deformation error and the machining error caused a relatively large error compared to the geometric error, which is directly related to the machining accuracy. In order to eliminate the error factors, the possibility of error compensation was examined by analyzing the measured error profile shape. As a result, about 40 ~ 50% error compensation was achieved for each error factor. Through this study, it is possible to construct a basic data base on machining, and it is expected that it will be able to compensate the machining error from the viewpoint of users.

• Key Words : Geometric error, Thermal error, Machining error, Error compensation, Machine tool

1. 서론

공작기계가 가지는 기본적인 정밀도를 최대한 활용하며 가공을 하기 위해서는 공작기계 정밀도의 적절한 유지를 통해 공작기계의 정밀도를 유지하는 것이 필요하다. 이를 위해서는 공작기계에서 발생할 수 있는 오차의 원인과 그 상대적 크기를 분석하고, 오차를 보정해주는 것이 필요하다고 할 수 있다. 이는 공작기계 생산자와 사용자 모두에게 매우 중요한 일이라 할 수 있다.

*Corresponding Author : 윤재웅(jwyoun@daegu.ac.kr)
Received April 11, 2017 Revised May 11, 2017
Accepted May 20, 2017 Published May 28, 2017

공작기계에서 발생하는 오차는 크게 기하학적 오차, 열변형 오차 및 가공 오차 등으로 나눌 수 있다. 먼저 기하학적 오차는 공작기계를 구성하는 구조물의 제작 및 조립 정밀도에 의해 발생하고, 열변형 오차는 공작기계의 발열 및 가공 부위의 온도 상승에 의해 발생하며, 가공오차는 절삭 부하에 의한 공구변형에 의해 발생하게 된다. 공작기계 및 가공에서의 오차는 이러한 오차들의 중첩된 결과로 나타나게 되므로, 각 오차 요인의 상대적 크기를 분석하고, 이를 통하여 오차를 보정해 줌으로써 가공의 정밀도를 향상시킬 수 있다.

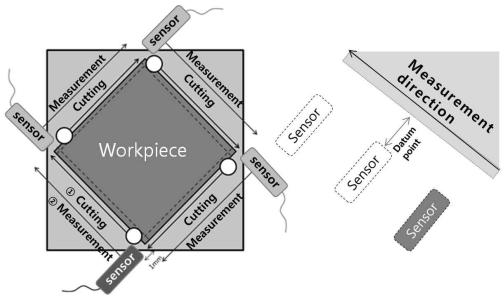
공작기계의 오차에 대한 분석을 위해 다양한 연구가 수행되어 왔다. 그러나 이와 같은 연구는 기하학적 오차[1,2,3,4,5], 열변형 오차[6,7,8,9] 또는 가공오차[10,11,12] 각각에 대해 오차 크기와 경향 등을 분석하거나 오차의 보정[1,2,5,13]을 위해 다양한 방법을 제시하기는 하였으나, 공작기계의 각 오차 성분들의 상대적 크기를 종합적으로 측정하고 분석하는 연구는 부족하였으며, 그 결과를 이용하여 오차의 보정까지 제시한 논문은 거의 없다고 할 수 있다.

본 연구에서는 공작기계의 정밀도에 영향을 미치는 오차의 원인으로서 기하학적 오차, 열변형 오차 및 가공오차로 오차의 원인을 분류하였다. 각 오차의 상대적 크기를 측정하기 위해 오차분석용 시편을 가공한 후, 가공면을 정밀 측정함으로써 오차 프로파일 커브를 생성하고 오차의 상대적 크기와 그 원인을 분석하였다. 이렇게 측정된 오차 프로파일은 오차의 보정을 위한 기본적인 데이터로 활용하였다. 본 연구에서는 측정된 오차를 보정해줌으로써 전체적인 오차를 50% 이상 줄일 수 있었다. 본 논문에서 제시하는 방법은 오차의 측정 및 보정을 보다 단순하게 함으로써 측정 숙련자에 대한 의존도를 줄이고 측정 시간도 단축함으로써 공작기계 제작자 및 사용자가 쉽게 오차를 보정해 줌으로써 정밀 가공에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

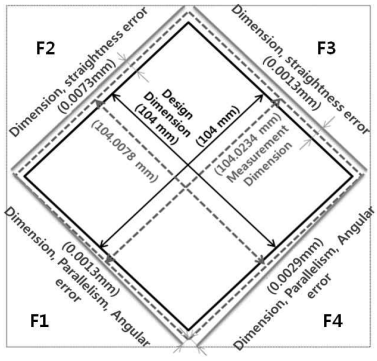
2. 오차의 측정 방법

본 연구에서는 Fig. 1과 같이, 오차 측정을 위해 단순 마름모꼴 형태의 표준공작물(Test workpiece)을 정의하였고[14], 앞에서 언급한 3가지 오차요인을 유발하도록 가공조건을 설정하여 표준공작물을 가공하였다. 먼저, 가공된 표준공작물 4면의 기하학적 오차 및 가공 오차를 변위센서(Keyence EX-V02, 해상도 0.4μm)를 통해 측정하였고, 각 면의 중앙점을 오차 "0"으로 하여 면 전체의 상대적인 오차값을 측정하였다.

한편, 표준공작물의 총 오차는 표준공작물 가공과정에서 발생된 오차와 표준공작물 자체의 치수오차를 더하여 산출할 수 있다. 이를 위해, 먼저 연삭 가공된 표준공작물을 3차원 측정하여 표준공작물의 치수오차를 사전에 측정하였고 그 결과 표준공작물의 오차는 Fig. 2와 같았다.



[Fig. 1] Measuring Processes



[Fig. 2] Dimensional error of test workpiece

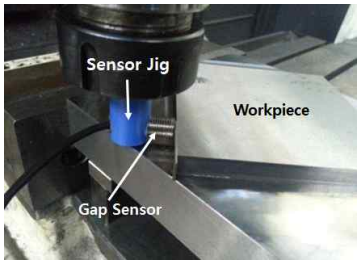
표준공작물의 측정 순서는 다음과 같다. 먼저, Fig. 3과 같이, 변위센서를 스핀들에 부착하고, NC 코드를 작성하여 측정하고자 하는 면을 따라 변위센서를 이동하며 표준공작물의 기하학적 오차를 측정한다. 이렇게 측정된 오차 프로파일 커브를 저장하고, 측정이 완료된 면을 주어진 절삭조건으로 가공한다. 마지막으로 가공된 면을 다시 측정하여 발생된 오차 프로파일 커브를 저장한다. 같은 방법으로 4개의 면을 모두 측정한다.

공작기계의 오차요인을 개별적으로 파악하기 위하여 가공 시 가공조건을 각각 다르게 설정하였다. 열변형 오차는 주축계의 온도가 충분히 높아질 수 있도록 장시간

주축을 공회전 한 후 가공하였으며, 가공 오차는 긴 공구를 이용하여 절삭깊이를 크게 함으로써 공구 끝단에서의 변형이 커지도록 하였다.

결국, 공작기계의 기하하적 오차는 표준공작물의 측정 오차에서 표준공작물 자체의 오차를 뺀 값이고, 열변형 오차 및 가공오차는 표준공작물의 가공 후 각각 측정된 가공면의 오차에서 공작기계의 기하하적 오차를 뺀 값이라고 할 수 있다.

주어진 NC 코드에 따라 변위센서는 측정면과 평행하게 이동하며 오차를 측정하게 되고, 측정된 오차는 A/D 변환 및 측정 잡음(Noise) 제거를 위한 저주파필터링(Low-pass filtering)을 실시한 후 최종적으로 오차 프로파일 커브를 얻게 된다. Table 2에서와 같이, 최종 오차는 위치 및 회전오차 성분으로 나타낼 수 있다.

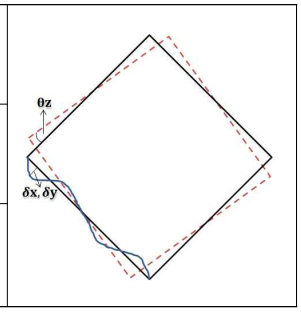


[Fig. 3] Measuring method

<Table 1> Grouping of error sources

Error	Definition of Error
Geometric error	Measuring error - Dimensional error pf test workpiece
Thermal error	Measuring error - Geometric error
Machining error	Measuring error - Geometric error

<Table 2> Error components

θ_z	Rotation error about Z axis	
δ_x	X axis position error	
δ_y	Y axis position error	

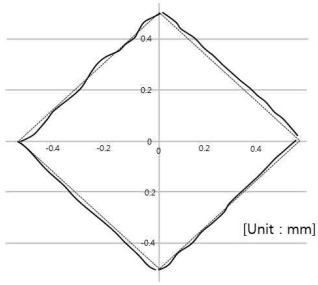
3. 오차 프로파일 분석

3.1 기하하적 오차 프로파일 분석

기하학적 오차에 대한 측정결과를 Table 3에 표시하였다. 마름모 형상의 표준공작물 4개의 면에 대하여 각각 평균오차, 최대오차 및 각도오차를 나타내었으며, 각도오차는 최소자승법(Least- square-fit)을 이용하여 계산한 각도편차를 보여준다. 기하학적 오차요인에 대한 프로파일 분석결과는 Fig. 4와 같다.

<Table 3> Analysis result of Geometric error

	Face 1	Face 2	Face 3	Face 4	Average
Average Error(μm)	4.1	3	6.4	5.3	6.5
Maximum Error(μm)	10	13.2	11.8	7.1	19.3
Angular Error(arcsec)	20.6	92.7	15.2	113.4	43.9



[Fig. 4] Geometric error profile

기하학적 오차의 프로파일 커브는 전체적으로 균일하게 나타나고 있으며, 평균오차는 약 $5\mu m$이고, 각도오차는 평균 60arcsec로 비교적 양호한 오차를 보이고 있다. 2면과 4면에서 상대적으로 큰 각도오차를 나타내고 있다.

3.2 열변형 오차 프로파일 분석

기하학적 오차를 분석하는 경우에는 가공하지 않은 채로 측정만 수행하지만, 열변형 오차를 분석하기 위해서는 표준공작물을 가공하고, 가공의 오차에 열변형 오차가 포함되도록 하였다. 또한, 가능하면 가공오차를 배제하기 위해 절삭 깊이는 매우 작게 하여 가공하였다. 먼저, 스핀들의 열변형을 최대화하기 위해 본 공작기계의 최대 회전속도인 8,000RPM에서 무부하로 8시간 가동한

시킨 후 가공하였다. 또한, 절삭 깊이를 0.5mm로 선정하여 공구의 변형을 최소화하였다. 열변형 오차를 분석하기 위한 가공조건은 Table 4와 같다. 열변형 오차 성분에 대한 오차 측정결과 및 오차 프로파일형상 분석결과를 Table 5 및 Fig. 5에 나타내었다.

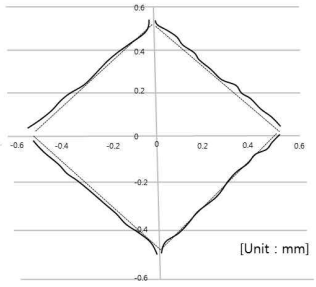
열변형 오차 측정결과, 기하학적 오차에 비해서 전체적으로 높은 오차를 나타내었다. 전체적으로 평균 오차는 약 1.5배, 각도오차는 약 2배 가까운 오차로 커짐을 알 수 있었다.

<Table 4> Cutting Condition for measurement of thermal error

Feed	RPM	Depth of cut	Operation
230mm/min	8,000	0.5mm	Air-cutting (8hr, 8,000rpm)

<Table 5> Analysis result of thermal error

	Face 1	Face 2	Face 3	Face 4	Average
Average Error(μm)	7	9.9	9.2	10.1	9.1
Maximum Error(μm)	15.2	23	19	11	17.3
Angular Error(arcsec)	75.6	79.2	48.8	90	72.9



[Fig. 5] Thermal error profile

3.3 가공오차 프로파일 분석

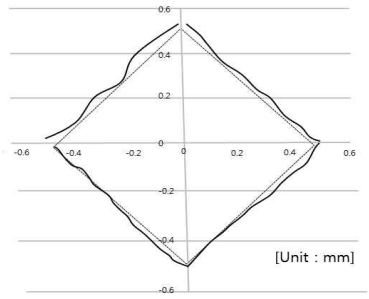
가공오차 요인을 파악하기 위하여 의도적으로 공구변형을 크게 하여 가공하는 것이 필요하다. 공구길이를 25mm 늘려 70mm 길이로 표준공작물을 가공하였으며, 절삭 깊이는 2mm로 하였다. 가공조건은 Table 6과 같다. 가공오차에 대한 측정결과 및 오차 프로파일 형상 분석결과를 Table 7과 Fig. 6에 나타내었다.

<Table 6> Cutting conditions for measurement of tool deflection error

Feed	RPM	Depth of cut	Tool Length
230mm/min	1,800	2mm	45mm → 70mm

<Table 7> Analysis result of tool deflection error

	Face 1	Face 2	Face 3	Face 4	Average
Average Error(μm)	10.2	14.8	5.1	8	9.525
Maximum Error(μm)	21.6	39.5	12.2	17.6	22.725
Angular Error(arcsec)	123.696	164.88	41.256	61.884	98.679

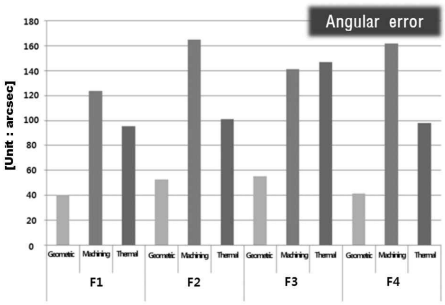


[Fig. 6] Profile of Machining error

가공오차는 측정된 오차의 크기가 열변형 오차와 유사한 정도로 나타났으며, 각도오차는 열변형 오차보다 더 크게 나타나고 있다. 가공 오차는 절삭 조건에 따라 달라질 수 있는 오차로서 각 오차들의 상대적인 크기를 비교하기 위한 것으로 본 연구에서는 그 절대 크기는 큰 의미가 없으며, 향후 절삭조건에 대한 절삭력의 크기를 파라미터로 하여 오차의 크기를 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

최종적으로 3가지 요인에 대한 프로파일 분석을 실시한 결과, 전체적으로 기하학적 오차성분 보다 열변형, 가공부하에 의한 오차 성분이 훨씬 더 높은 경향을 보였다. 가공오차와 열변형 오차의 경우에 오차의 크기가 유사한 경향을 나타냈지만 오차에 대한 프로파일 형태는 다르게 나타났다. 일반적으로 x, y 축의 위치 오차의 경우, 시스템오차와 랜덤오차를 모두 포함하고 있어, 일부 보정이 어려울 수 있으나, 각도 오차의 경우는 대부분 시스템 오차이므로 보정이 가능할 것으로 판단된다. 각 오차 요인별 각도오차의 상대적 크기를 Fig. 7에 나타내었다.

앞에서 측정된 각 위치오차 및 각도오차는 각 오차요인별 성분에 대한 보정 파라미터의 계산을 통해 보정이 가능할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 오차의 보정을 통해 오차요인을 제거함으로써 정밀 가공이 가능할 수 있도록 하고자 한다.



[Fig. 7] Angular error comparison for each error source

4. 공작기계 오차의 보정

4.1 오차 보정 방법

일반적인 오차의 보정은 다항식의 형태로 비선형 오차 보정을 하는 방법도 있으나[15], 3축 공작기계의 오차 성분은 각 축에 대한 회전오차 성분(θ_x, θ_y, θ_z)과 위치오차 성분(δ_x, δ_y, δ_z)으로 나타낼 수 있다. 이때, 회전 및 위치오차 에 대한 보정 행렬은 식 (1)과 같이 4X4의 동차변환 행렬로 구성된다[16].

$$\begin{vmatrix} 1 & -\theta_z & \theta_y & \delta_x \\ \theta_z & 1 & -\theta_x & \delta_y \\ -\theta_y & \theta_x & 1 & \delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} x-\theta_z y+\theta_y z+\delta_x \\ \theta_z x+y-\theta_z+\delta_y \\ -\theta_y x+\theta_x y+z+\delta_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

본 연구에서는 오차의 요인별 상대적 크기를 분석하고, 그 보정방법의 적용 가능성을 검토하기 위하여, Z축을 제외한 2개의 축에 대한 오차 보정 방법만을 제시하고 추후 3축으로 확장하고자 한다. 본 연구에서는 다음과 같이 오차요인별 오차성분을 이용하여 아래와 같이 세 가지의 오차 파라미터를 구성할 수 있다.

① Geometric error:

$$\begin{bmatrix} 1 & -(\theta_z)_1 & (\delta_x)_1 \\ (\theta_z)_1 & 1 & (\delta_y)_1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x-(\theta_z)_1 y+(\delta_x)_1 \\ (\theta_z)_1 x+y+(\delta_y)_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

② Thermal error:

$$\begin{bmatrix} 1 & -(\theta_z)_2 & (\delta_x)_2 \\ (\theta_z)_2 & 1 & (\delta_y)_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x-(\theta_z)_2 y+(\delta_x)_2 \\ (\theta_z)_2 x+y+(\delta_y)_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

③ Machining error:

$$\begin{bmatrix} 1 & -(\theta_z)_3 & (\delta_x)_3 \\ (\theta_z)_3 & 1 & (\delta_y)_3 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x-(\theta_z)_3 y+(\delta_x)_3 \\ (\theta_z)_3 x+y+(\delta_y)_3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

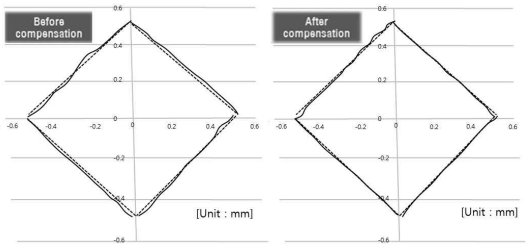
식(2) ~ 식(4)와 같이 정의된 오차 보정행렬을 이용하여, 공구궤적을 생성하거나, 또는 기존 NC 데이터를 수정하게 되면 공작기계 오차를 반영한 새로운 NC 데이터를 생성할 수 있다. 즉, 기하학적 오차, 열변형 오차 및 가공 오차를 반영하여 3번의 공구궤적을 보정하게 되면, 각 요인별 오차가 보정된 새로운 공구궤적을 계산할 수 있는 것이다. 이와 같은 방법으로 기존 NC 코드의 위치 데이타를 보정하여 새로운 NC 코드를 생성한 후, 보정된 NC데이터로 2차 가공실험을 진행하였다.

현재 실험에 수행된 표준공작물은 X,Y 2축으로만 가공하도록 되어있지만, 향후 추가적인 연구를 수행하여 3축으로 확장하고자 한다.

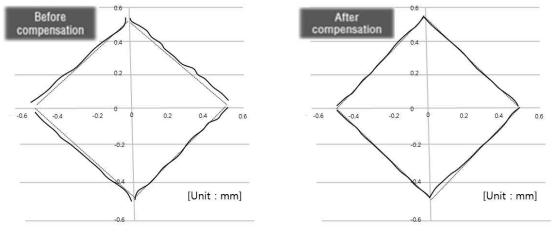
4.2 오차요인별 보정 결과

공작기계의 각 오차요인에 대한 보정을 실시하고 재가공을 한 결과는 다음과 같다. 먼저, 기하학적 오차에 대한 보정결과는 Table 8 및 Fig. 8과 같다. 기하학적 오차요인에 대하여 보정 전과 후를 비교분석 하였을 때, 전체적으로 오차의 보정이 잘 이루어져 기존의 오차에서 위치오차의 경우 약 34% 정도의 오차보정이 이루어졌으며, 각도오차의 경우에는 약 88% 정도의 보정이 이루어졌음을 확인 할 수 있다.

열변형 오차요인에 대한 오차보정 결과는 Fig. 9와 Table 9에 나타내었다. 열변형 오차요인에 대한 오차보정 결과, 보정 전에 비해 상당히 보정이 이루어져 기존의 오차에서 위치오차의 경우 약 69% 정도의 오차보정이 이루어졌으며, 각도오차의 경우에는 약 89% 정도의 보정이 이루어졌음을 확인 할 수 있다. 보정 전에 기하학적 오차와 비교하여 많은 편차를 보였던 열 변형 오차는, 보정 후에 그 오차 요인이 대부분 제거되었다고 볼 수 있다.



[Fig. 8] Compensated profile of geometric error



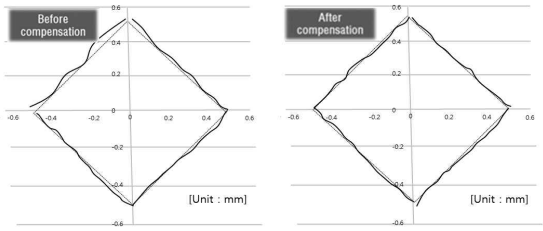
[Fig. 9] Compensated profile of thermal error

<Table 8> Compensation result of Geometric error

		Average Error(μm)	Maximum Error(μm)	Angular Error(arcsec)
Face 1	Before	4.1	10	20.6
	After	1.5	6.7	4.4
Face 2	Before	3	13.2	92.7
	After	2.7	5.1	6.5
Face 3	Before	6.4	11.8	15.2
	After	1.4	6.8	3.8
Face 4	Before	5.3	7.1	113.4
	After	1.9	4.3	7.6
Average	Before	6.5	19.3	43.9
	After	4.3	7.5	5.4

<Table 9> Compensation result of thermal error

		Average Error(μm)	Maximum Error(μm)	Angular Error(arcsec)
Face 1	Before	7	15.2	75.6
	After	4.1	6.5	7.5
Face 2	Before	10	23	79.2
	After	1.9	6.1	7.2
Face 3	Before	9	19	48.8
	After	5.6	6.8	8.1
Face 4	Before	10.1	11	90
	After	3	6.3	10.5
Average	Before	11.5	17.2	72.9
	After	3.6	6.4	8.3



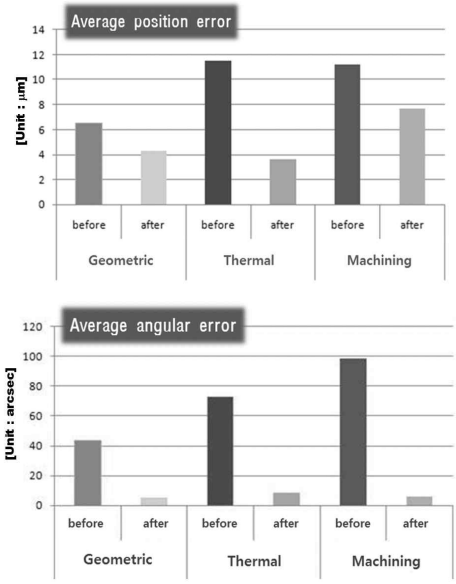
[Fig. 10] Compensated profile of machining error

<Table 10> Compensation result of tool deflection error

		Average Error(μm)	Maximum Error(μm)	Angular Error(arcsec)
Face 1	Before	10.2	21.6	123.6
	After	9.2	7.5	5.4
Face 2	Before	17.8	39.5	164.8
	After	11.3	8.8	7.1
Face 3	Before	9.1	17.2	41.2
	After	4.1	8.3	2.8
Face 4	Before	8	10.6	61.8
	After	6.3	9.2	8.2
Average	Before	11.2	22.7	98.6
	After	7.7	8.5	5.9

가공 오차에 대한 오차보정 결과는 Fig. 10 및 Table 10과 같이 나타내었다. 위치오차의 경우 약 31% 정도의 오차보정이 이루어졌으며, 각도오차는 약 94% 정도의 보정이 이루어졌음을 확인 할 수 있다. 가공오차에서 각도오차는 대부분 보정이 된 반면, 위치 오차에서는 오차 보정이 다른 오차에 비해 상대적으로 낮게 보정된 것을 볼 수 있다. 이것은 기하학적 오차 및 열변형 오차가 주로 공작기계의 시스템 오차에 의존하는 반면, 가공오차는 절삭력의 변동이 좌우하기 때문인 것으로 판단된다.

최종적으로 공작기계에서 발생하는 3가지 오차요인에 대하여 보정을 실시한 결과, 전체적으로 위치 오차는 평균 약 45%, 각도 오차는 평균 약 90% 정도 감소하는 것을 알 수 있었다. 각도 오차에 비해 위치 오차의 감소가 작은 것은, 앞에서도 언급한 바와 같이, 위치 오차는 랜덤 오차를 포함하고 있기 때문이다. 그러나, 각도오차의 보정만으로도 보정의 효과는 충분하다고 판단된다. Fig.11에 보정 전과 후의 위치오차 및 각도오차를 나타내었다.



[Fig. 11] Accuracy Compensation result for each error source

5. 결론

본 연구에서는 공작기계에 발생하는 오차 요인을 3가지로 나누고 각 요인에 대한 오차의 상대적 크기를 분석하고, 오차를 보정함으로써 정밀한 가공이 이루어질 수 있는 방법에 대해 연구하였고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 공작기계의 오차를 기하학적 오차, 열변형 오차 및 가공오차로 분류하고 오차의 크기를 정밀 측정하였다. 각 요인별 오차의 측정을 위해 표준공작물을 정의하였고, 비접촉식 변위 센서를 이용하여 오차의 프로파일을 측정하였다. 그 결과 각 오차의 상대적 크기 및 경향을 분석할 수 있었으며 이 방법은 오차를 분석하는데 적절한 것으로 판단되었다.
2. 공작기계의 기하학적 오차 성분은 열변형 오차 및 가공 오차의 크기에 비하여 상대적으로 작은 오차 크기를 나타내었다. 평균 오차의 경우 열변형과 가공오차가 유사한 크기를 나타내고 있지만, 각도오차의 경우 가공오차가 현저히 큰 경향을 나타내며, 열변형 오차에서의 각도오차도 큰 값을 보여주고 있다. 결과적으로 기하학적 오차요인보다 열 변형 및 가공부하에 의한 오차요인이 더 큰 오차를 발생시키고 있음을 알 수 있었다.
3. 본 연구에서는 오차 분석을 통해 오차의 보정방법을 제시하였으며, 보정 결과 위치 오차의 경우 각각 기하학적 오차, 열변형 오차 및 가공오차가 34%, 69% 및 31% 감소함으로 알 수 있었고, 각도 오차의 경우에는 각각 88%, 89% 및 94% 감소하여 오차보정을 통한 정밀가공이 가능함으로 확인하였다.

이러한 결과는 기존에 공작기계 보정 절차가 매우 복잡하여 보정을 위한 많은 시간과 비용이 드는 문제를 비교적 쉽게 해결할 수 있음으로써 공작기계 생산자 및 사용자 입장에서 공작기계의 보정(Calibration)을 쉽게 할 수 있는 가능성을 제시하였다고 판단된다. 본 연구는 현재 2축에 대한 각 오차요인별 오차의 상대적 크기 및 그 보정 방법에 대한 기초 연구로서 향후 3축 보정이 가능할 수 있도록 보정을 확대하여 진행할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 논문은 2014학년도 대구대학교 학술연구비의 지원에 의한 논문임

REFERENCES

[1] R. Ramesh, M. Mannan, A. Poo, "Error compensation in machine tools－a review. Part I: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors", Int J. Mach. Tool Manu., Vol.40, No,9, pp.1235-1256, 2000.

[2] Schwenke H, Knapp W, Haitjema H, "Geometric error measurement and compensation of machines －an update", Annals of the CIRP, Vol.57, No.2, pp.660-675, 2008.

[3] Y. Schmitz, J. Ziegert, J. Canning, R. Zapata, " Case study: A comparision of error sources in high-speed milling", Precision Engineering, Vol.32, pp.126-133, 2009.

[4] S. Ibaraki, M. Sawada, A. Matsubara, T. Matsushita, "Machining tests to identify kinematic errors on five-axis machine tools", Precision Engineering, Vol.34, pp.387-398, 2010.

[5] S. Aguado, D. Samper, J. Santolaria, "Towards an

effective identification strategy in volumetric error compensation of machine tools", Meas Sci Technol., Vol.23, No.6, pp.1-12, 2012.

[6] R. Ramesh, M. Mannan, A. Poo, "Error compensation in machine tools-a review. Part II: thermal errors", Int J. Mach. Tool Manu., Vol.40, No,9, pp.1257-1284, 2000.

[7] M. Attia, L. Kops, "Computer simulation of nonlinear thermoelastic behaviour of a joint in machine tool structure and its effect on thermal deformation", ASME Trans. J. of Eng. for Ind. Vol.101, pp.355-361, 1979.

[8] M. Attia, L. Kops, "A new method for determining the thermal contact resistance at machine tool joints", Annals of the CIRP, Vol.30, No.1, pp.259-264, 1981.

[9] R. Ramesh, M. Mannan, A. Poo, "Error compensation in machine tools - a review Part II: thermal errors", Int. J. Mach. Tools Manuf., Vol. 40, pp.1257-1284, 2000.

[10] W. Yun, D. Cho, "An improved cutting force model considering the size effect in end milling", ASME Int. Mech. Eng. Congress and Exposition, Orlando, pp.223-229, 2000.

[11] G. Kim, B. Kim, C. Chu, "Estimation of cutter deflection and formerror in ball-end milling process", Int. J. Mach. Tools Manuf., Vol. 43, pp.917-924, 2003.

[12] Y. Cheng, J. Chin, "Machining contour errors as ensembles of cutting, feeding and machine structure effects", Int. J. Mach. Tools Manuf., Vol.43, pp.1001-1014, 2003.

[13] K. H. Kim, A Study on the Accuracy Analysis of 3-Axis and 5-Axis Machining Center and Error Compensation, Master Thesis, Daegu Univ. 2015.

[14] KS B ISO Standards. "Test conditions for machining centres-Part 2:Geometric tests for machines with vertical spindle or universal heads with vertical primary rotary axis(vertical Z-axis)" KS B ISO 10791-2, 2007

[15] C. Eun, Y. C. Lee, "Compensation of the non-linearity of the audio power amplifier converged with digital signal processing technique", J.of the Korea Convergence Society, Vol.7, No.3, pp.77-85

[16] S. W. Lee, Development of thermal error measurement and compensation system for spindle and feed axis in CNC machine tools, Ph.D Thesis, Deoul National Univ. 2000

저자소개

김 기 환(Ki-Hwan Kim) [정회원]

- 2013년 2월 : 대구대학교 기계공학부 자동차공학과 (공학사)
- 2015년 2월 : 대구대학교 일반대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 경북차량용임베디드기술연구원 연구원

<관심분야> : 공작기계 설계 및 해석, 5축 가공, 성형해석

윤 재 웅(Jae-Woong Youn) [정회원]

- 1990년 2월 : KAIST 생산공학과 (공학석사)
- 1995년 2월 : KAIST 정밀공학과 (공학박사)
- 1994년 12월 ~ 1999년 8월 : 삼성중공업 중앙연구소 선임연구원
- 1999년 9월 ~ 현재 : 대구대학교 기계공학부 교수

<관심분야> : 정밀가공, 5축 가공, 공작기계 설계, 생산자동화