

볼바 시스템을 이용한 기상측정오차 보정

이세희*, 서태일**, 조명우***

On-Machine Measurement Error Compensation Using Ball-bar System

Se-Hee Lee*, Tae-Il Seo**, Myeong-Woo Cho***

Abstract

The objective of this research is to develop a measurement error compensation method for On-Machine Measurement (OMM) process based on a closed-loop configuration. Geometric errors of vertical machining center are measured using ball-bar system, and probing errors are measured using master ball. The errors are represented using homogeneous transformation matrices and the closed-loop configuration method is applied to calculate 3-dimensional errors. To verify the effectiveness of the method proposed in this research, compensated results are compared to the data using CMM process, and the results are analyzed. The results show the proposed method can be applied in OMM process to make the measured data more reliable.

Key Words : On-Machine Measurement(기상측정), Ball-bar system(볼바 시스템), Error compensation(오차보상)

1. 서 론

기상측정(On-Machine-Measurement : OMM) 시스템은 CNC 머시닝 센터 내에서 절삭공구와 측정용프로브와의 교환을 통하여 다른 측정용 전용기의 이용없이 가공 및 가공물의 가공정밀도 측정을 구현하기 위하여 개발된 장치이다. 접촉식 프로브를 공구와 같이 공구 매거진에 끼워서 사용하며, 접촉식 프로브에서 발신되는 적외선 신호를 수신하여 공작물의 정밀도를 판정하기 때문에 3차원 측

정기를 사용하는 검사공정에 비하여 측정시간의 단축, 검사공정의 효율화, 단순화를 도모할 수 있다는 장점을 가지고 있다⁽¹⁻¹⁰⁾. 그러나, 일반적인 공작기계를 사용하는 기상측정은 공작기계의 정밀도가 3차원 측정기에 비하여 낮으며, 테이블의 관성 등에 의하여 측정된 결과의 신뢰도가 저하되는 단점을 가지고 있다⁽²⁾. 이러한 정밀도에 영향을 미치는 요인으로는 공작기계의 기하학적 오차, 열변형에 의한 오차, 동적 특성에 의한 오차, 접촉식 프로브의 오차가 복합되어 나타난다^(4,5,6,8,9,11-12).

* 인하대학교 기계공학과 대학원
** 인하대학교 기계기술공동연구소
*** 인하대학교 기계공학과(chomwnet@inha.ac.kr)

본 연구에서는 공작기계 각 오차요소에 대하여 폐회로 구조(closed-loop configuration)^(6,7)를 적용하여 수직형 머시닝 센터에 의한 기상측정시 발생하는 측정오차를 보정하여 측정 정밀도를 향상시키는 방법을 제시하였다. 공작기계의 정밀도를 측정하는데 이용되는 시스템으로는 레이저 간섭계(laser interferometer)와 볼바 시스템(ball-bar system)이 주로 이용된다. 일반적으로 볼바 시스템은 레이저 간섭계에 비하여 정밀도는 떨어지나 저가이며, 신속하고 용이하게 공작기계의 정밀도측정이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 공작기계의 정밀도 측정을 위하여 볼바 시스템을 사용하였으며, 프로브 오차의 측정을 위하여 마스터링(master ring)을 사용하였다. 동일한 공작물에 대하여 기상측정과 3차원 측정기에 의한 측정을 동시에 수행하여 오차의 보정전과 보정후의 결과를 비교하였으며, 실험결과 제시된 방법의 효용성을 검증하였다.

2. 기상측정오차 모델링

2.1 공작기계의 기하학적 오차

공작기계의 기하학적 오차는 각 축 방향에 대하여 발생하는 병진오차(translational errors)와 회전오차(rotational errors), 그리고 각 축사이의 직각도오차(squareness errors)의 합으로 표현되며, 본 연구에서 사용된 3축 수직형 머시닝 센터의 경우 각 오차 성분은 다음과 같이 표현될 수 있다^(3,7).

2.1.1 병진오차와 회전오차

X축 방향으로 이송시 공작기계 원점에 대한 좌표변환 행렬 T_i 는 회전각이 미소한 경우 다음과 같은 4×4변환 행렬에 의하여 표시될 수 있으며, Y, Z축 방향으로 이송시의 좌표변환행렬 T_i, T_k 도 동일한 방법으로 구해진다.

$$T_i = \begin{bmatrix} 1 & -EC(X) & EB(X) & EX(X)+Dx \\ EC(X) & 1 & -EA(X) & EY(X) \\ EB(X) & EA(X) & 1 & EZ(X) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$EX(X_i)$: X_i 축 방향으로 이송시 X_i 축에 대하여 발생하는 병진오차 성분

$EA_i(X_i)$: X_i 축 방향으로 이송시 X_i 축에 대하여 발생하는 회전오차 성분

D_x : 제이거 지령에 의한 X 방향의 목표위치

여기서 $X_i=X, X_j=Y, X_k=Z$ 이고 $A_i=A, A_j=B, A_k=C$ 를 나타낸다.

2.1.2 직각도 오차

수직형 3축 머시닝 센터의 직각도 오차는 Z축을 기준으로 할 때, Z축과 X, Y 두 축 사이의 각도오차로 정의되며, 오차가 미소한 경우 Z축에 대한 X축의 직각도 오차에 의한 4×4 변환행렬은 다음과 같이 표현되며, Y축의 직각도 오차도 동일한 방법으로 표현된다.

$$T_{ik} = \begin{bmatrix} 1 & -EC(XZ) & EB(XZ) & 0 \\ EC(XZ) & 1 & 0 & 0 \\ EB(XZ) & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$EA_i(XZ)$: Z축을 기준으로 한 X축의 X_i 축 방향의 직각도 오차 성분

$EA_i(YZ)$: Z축을 기준으로 한 Y축의 X_i 축 방향의 직각도 오차 성분

2.1.3 이송운동에 의한 기하학적 오차

임의의 좌표계에서 공작기계에 의하여 발생하는 기하학적 오차는 병진오차 및 회전오차와 각 축사이의 직각도 오차의 합으로 표현된다. 공작기계의 테이블이 X축 방향으로 이송될 때 최종 목표점에서의 변환행렬 T_X 는 다음과 같이 표현되며, 같은 방법으로 T_Y 와 T_Z 를 구할 수 있다.

$$T_X = T_{ik}L_X - L_X \quad (3)$$

여기에서 L_X 는 테이블이 D_x 만큼 이송되었을 때의 좌표 변환행렬이다.

2.2 접촉식 프로브의 측정오차

기상측정에 널리 사용되는 접촉 트리거 방식 프로브의 변환기는 트리거링(triggering) 회로를 가지는데, 트리거링을 야기하는 미소변위는 프로브의 접촉방향에 따라서 변화하며, 이를 프로브 오차(probe lobbing error, pre-travel variation)라 한다. 본 연구에서는 이러한 프로브 오차를 공작기계의 기하학적 오차 모델과 결합하여 기상측정시 발생하는 측정오차를 보정하였다.

2.2.1 프로브 오차

접촉식 프로브의 오차는 다른 기하학적 오차와는 달리 위치에 따라 변화하는 함수가 아니고 프로브의 접촉방향에 따라 변화하는 함수이며, 기준구(master ball)의 측정 데이터를 사용하여 보정될 수 있다. 이때, 프로브 볼의 유효반지름을 R_e , 기준구의 (φ_i, θ_j) 방향으로 정의되는 프로브 오차를 $PE(\varphi_i, \theta_j)$ 라고 하고, (φ_i, θ_j) 위치에서의 기준구 반경을 $R_s(\varphi_i, \theta_j)$ 그리고 기준구와 프로브 볼 중심사이의 측정거리를 $R_m(\varphi_i, \theta_j)$ 이라고 하면, 다음과 같은 관계가 성립된다⁽³⁴⁾.

$$R_e - PE(\varphi_i, \theta_j) = R_m(\varphi_i, \theta_j) - R_s(\varphi_i, \theta_j) \quad (4)$$

공작기계의 기계좌표계에서 정의되는 프로빙방향의 단위벡터를 (M_x, M_y, M_z) 라 할 때, 프로브오차에 의한 측정오차의 좌표변환행렬은 다음과 같다.

$$TL = PE(\varphi_i, \theta_j)[M_x \ M_y \ M_z \ 1]^T \quad (5)$$

2.2.2 공작기계상의 프로브 좌표계

접촉식 프로브를 이용하여 곡면을 측정할 때, 측정오차를 최소화하기 위하여서는 프로브가 곡면의 법선방향으로 접근하여야 한다. 이렇게 곡면의 법선방향에 따라서 변화하는 프로브 오차를 효과적으로 측정 및 평가하기 위하여 프로브의 접촉방향을 기준축으로 하는 프로브 좌표계가 사용되며, 두 좌표계 사이의 관계는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$[x' \ y' \ z' \ 1]^T = T_p[x \ y \ z \ 1]^T \quad (6)$$

여기에서 T_p 는 두 좌표계 사이의 4×4 좌표변환행렬이다.

2.3 폐회로 구조를 이용한 측정오차의 표현

기상측정에서 발생하는 측정오차는 프로브 볼 중심의 이상적인 위치와 각오차 성분에 의한 실제 위치의 차이로 정의될 수 있으며, 다음과 같이 구해진다.

2.3.1 프로브 볼 중심의 이론적 위치 계산

테이블 이송에 의한 오차요소를 포함한 측정점의 실제 위치 FPW 는 다음과 같이 표현된다.

$$FPW = T_x \ T_y \ W = \begin{bmatrix} FPX(W) \\ FPY(W) \\ FPZ(W) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

따라서, 측정점에 대응하는 프로브 볼 중심의 이론적 좌표 TPW 는 다음과 같이 구해진다.

$$TPW = \begin{bmatrix} TPX(W) \\ TPY(W) \\ TPZ(W) \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} FPX(W) + RN_x \\ FPY(W) + RN_y \\ FPZ(W) + RN_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

이 때, R 은 프로브의 공칭반경, 그리고 N 은 측정점에서의 단위법선벡터를 각각 나타낸다.

2.3.2 인식된 프로브 볼 중심의 좌표 계산

수직형 머시닝 센터의 경우, 측정 프로브는 Z축을 따라서 이송되므로, 프로브의 실제 위치는 Z축의 기하학적 오차에 따라 변환된다. 따라서, 이 때의 오차는 Z축의 기하학적 오차성분과 프로브 오차의 합으로 구해질 수 있다. 측정 프로브가 공작물과 접촉하여 변환기를 통하여 인식된 기계좌표계에서 프로브 볼의 좌표변환을 TPP 라고 하면, 이는 다음과 같이 구해진다.

$$TPP = T_x \ TL = \begin{bmatrix} TPX(T) \\ TPY(T) \\ TPZ(T) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

2.3.3 측정오차의 계산

최종적으로, 기상측정시 발생하는 3차원 측정오차 VE 는 주어지는 이론적인 측정 프로브의 좌표 TPW 와 실제 인식된 프로브의 위치 TPP 의 차이에 의하여 구할 수 있다.

$$VE = TPW - TPP =$$

$$\begin{bmatrix} TPX(W) \\ TPY(W) \\ TPZ(W) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} TPX(T) \\ TPY(T) \\ TPZ(T) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} VEX \\ VEY \\ VEZ \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기에서 VEX, VEY, VEZ 는 각각 측정오차의 X, Y, Z

방향의 성분이다.

3. 볼바시스템에 의한 기하학적 오차 측정

3.1 볼바 시스템의 개요

본 연구에서 공작기계의 기하학적 오차 측정을 위하여 사용된 볼바는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 볼바를 테이블에 고정시키기 위한 마그네틱 마운트, 스피indle에 고정되는 정밀 볼(ball), 볼의 지지대, 그리고 LVDT가 내장된 바(bar)로 구성되어 있으며, 회전 운동으로 공작기계의 여러 가지 기하학적 오차와 NC 관련 오차 들을 측정할 수 있다. 회전운동시, 공작기계 오차가 전혀 없으면 완전한 원을 구현할 수 있으나, 전술한 여러 가지 기하학적 오차 및 NC관련 오차로 인하여 Fig. 2와 같이 다양한 형태의 불완전한 도형(plot)을 얻는다. 이러한 도형의 형태(찌그러짐, 치우침, 크기 등)를 분석하여 공작기계의 정밀도를 판단하게 된다.

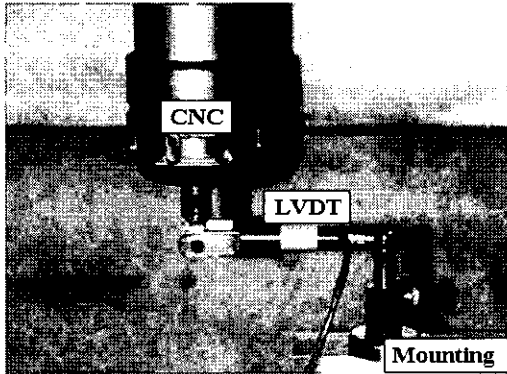


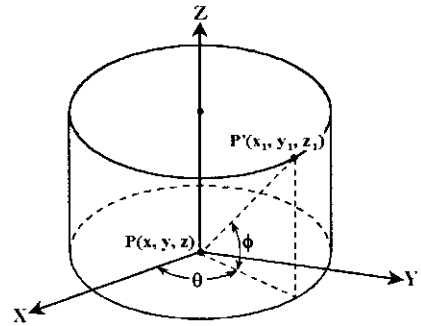
Fig. 1 Schematic diagram of Ball-bar system

3.2 측정경로 프로파일의 특성과 기본 해석

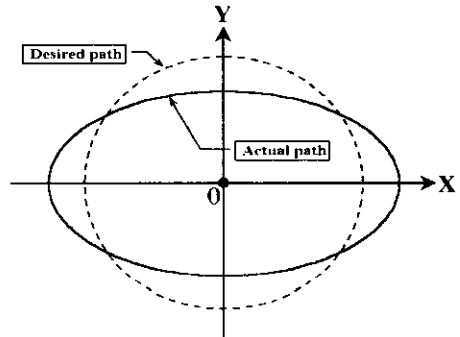
3.2.1 원형 경로의 해석

공작기계에 공구쪽의 볼 중심점을 공칭좌표위치 $P(x,y,z)$ 로 움직이라는 명령을 내렸을 때 오차요소에 의하여 볼은 실제로 Fig. 2-(a)와 같이 좌표 $P'(x_1,y_1,z_1)$ 로 움직일 것이며, 이때 각 좌표축의 오차 성분은 다음과 같이 표현된다.

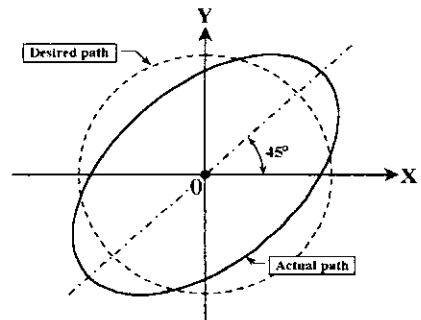
$$\begin{aligned} \delta_x &= (x_1 - x), \quad \delta_y = (y_1 - y), \quad \delta_z = (z_1 - z) \\ C &= (\delta_x, \delta_y, \delta_z) \end{aligned} \quad (11)$$



(a) Plot of contour error on the XYZ coordinates



(b) Plot of positional error



(c) Plot of squareness error

Fig. 2 Plots of geometric error for machine tool

여기에서 C 는 좌표 P 에서의 오차벡터를 나타낸다. 두 볼 중심 사이의 공칭거리를 R 이라 했을 때, 이상적인 경우라면, $R^2 = X^2 + Y^2 + Z^2$ 이지만, $P \neq P'$ 이므로 $(R + \Delta R)^2 = x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 = (x + \delta x)^2 + (y + \delta y)^2 + (z + \delta z)^2$ 이 된다. 여기에서 ΔR 은 두 볼 사이의 극좌표 길이 오차이며 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\Delta R = (x \cdot \delta_x + y \cdot \delta_y + z \cdot \delta_z) / R$$

$$= (\delta_x \cdot \cos\theta + \delta_y \cdot \sin\theta) \cdot \cos\phi + \delta_z \cdot \sin\phi \quad (12)$$

또한, 위의 식은 각 평면에 대하여 다음과 같은 관계를 가진다.

(1) X-Y 평면상($\phi=0^\circ$)에서

$$\Delta R = \delta_x \cdot \cos\theta + \delta_y \cdot \sin\theta \quad (13)$$

(2) Y-Z 평면상($\theta=90^\circ$)에서

$$\Delta R = \delta_y \cdot \cos\phi + \delta_z \cdot \sin\phi \quad (14)$$

(3) X-Z 평면상($\theta=0^\circ$)에서

$$\Delta R = \delta_x \cdot \cos\phi + \delta_z \cdot \sin\phi \quad (15)$$

3.2.2 진원도에 대한 특성값의 정의

(1) 반경 편위

프로파일의 진원도(circularity)는 진원도 측정기에서 적용되는 방법과 유사하게 평가되어진다. 즉, 프로파일의 최소 자승원 중심점에 대한 반경의 범위로 진원도를 나타낸다.

(2) 측정 기준 중심점으로부터의 편심

이 값은 프로파일 반경의 편위 범위로부터 평가되어지며, 진원도오차와 초기 설치 오차를 포함한다.

(3) 프로파일 직경의 편위

일반적으로 직경 편위량은 조화편위(harmonic deviation)가 되어질 때만 반경 편위의 두 배가 된다. 0도의 직경값은 x축의 위치 정확도, 90도의 직경값은 y축의 위치 정확도, 45도의 직경값은 직각도 오차값을 나타낸다.

(4) 편심도

편심도는 최소 자승원의 중심과 측정중심 사이의 거리로 정의되며, 공칭원으로 부터 편위와 초기 설치시 중심잡기의 영향을 나타낸다.

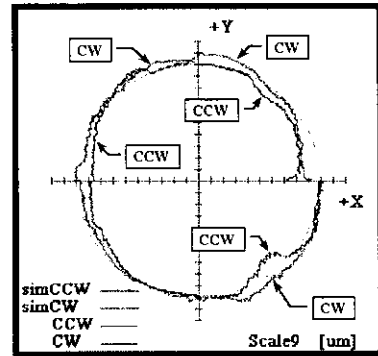
4. 실험 및 결과 분석

4.1 공작기계 및 프로브 오차 측정

4.1.1 볼바 시스템에 의한 기하학적 오차측정

본 연구에서 기상측정에 사용된 공작기계는 수직형 3축 머시닝 센터(HiMac-V100)이며, 여기에 Fig. 3에 나타낸

VOLUMETRIC ERROR ASSESSMENT (ver1.1)
SNU Precision Co., LTD



(a) Measured data plot

Result Chart of Dynamic Error Components

Rank	Error Component	Independent Circularity	value
1	Y-Reversal Spike Error	11.3μm (28.1%)	11.3μm
2	X-Reversal Spike Error	11.1μm (21.4%)	11.1μm
3	X-Positional Error	-7.3μm (14.1%)	-7.31μm/m
4	XY-Servo Gain Mismatch Error	-6.0μm (11.6%)	-6.0μm
5	Y-Positional Error	-5.6μm (10.8%)	-5.58μm/m
6	X-Backlash Error	4.7μm (9.0%)	4.7μm
7	XY-Squareness Error	-1.9μm (3.7%)	-1.92μm/m
8	Z-Angular Error Along X Axis	1.7μm (3.2%)	43.7μm/m
9	X-Straightness Error Along Y Axis	-0.8μm (1.6%)	-2.2μm
10	Z-Angular Error Along Y Axis	0.6μm (1.2%)	16.7μm/m
11	Y-Backlash Error	0.6μm (1.1%)	0.6μm
12	Y-Straightness Error Along X Axis	0.3μm (0.6%)	0.8μm
13	Z-Reversal Spike Error	0.0μm (0.0%)	0.0μm
14	XZ-Squareness Error	0.0μm (0.0%)	0.0μm/m
15	YZ-Squareness Error	0.0μm (0.0%)	0.0μm/m
16	Y-Angular Error Along Z Axis	0.0μm (0.0%)	0.0μm/m
17	X-Angular Error Along Z Axis	0.0μm (0.0%)	0.0μm/m
18	X-Angular Error Along Y Axis	0.0μm (0.0%)	0.0μm/m
19	Y-Angular Error Along X Axis	0.0μm (0.0%)	0.0μm/m
20	Y-Straightness Error Along Z Axis	0.0μm (0.0%)	0.0μm
21	X-Straightness Error Along Z Axis	0.0μm (0.0%)	0.0μm
22	Z-Straightness Error Along Y Axis	0.0μm (0.0%)	0.0μm
23	Z-Straightness Error Along X Axis	0.0μm (0.0%)	0.0μm
24	XZ-Servo Gain Mismatch Error	0.0μm (0.0%)	0.0μm
25	YZ-Servo Gain Mismatch Error	0.0μm (0.0%)	0.0μm
26	Z-Positional Error	0.0μm (0.0%)	0.0μm
27	Z-Backlash Error	0.0μm (0.0%)	0.0μm

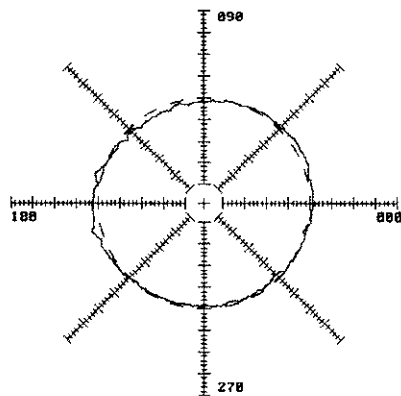
(b) Error components

Fig. 3 Measured error components

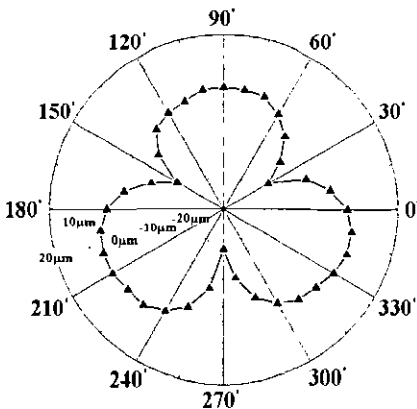
바와 같이 볼바(SNU precision)를 설치하여 위치결정오차, 직각도오차 등을 측정하였다. 사용된 볼바는 최대측정거리 1,200mm, 최대 분해능 0.1 μ m를 가지고 있다. 측정된 레적과 이로부터 계산된 공작기계 각 오차성분이 Fig. 3에 나타나 있다.

4.1.2 기준링을 사용한 프로브 오차 측정

본 연구에서는 접촉식 프로브(Renishaw, MP10)를 수직형 머시닝 센터에 장착하여 공작물의 기상측정에 사용하였으며, 접촉방향에 따라 변화하는 프로브 오차의 보정을 위하여 이를 기준링(Master ring)을 사용하여 오차를 측정하였다. 우선 기준링의 진원도(Circularity)를 측정하였다(참조 Fig. 4-(a)). 사용된 마스터링의 측정된 Roundness는



(a) Circularity of master ring



(b) Average probe errors

Fig. 4 Measured probe errors using master ring

0.396 μ m범위내의 정밀도를 갖는다. 프로빙오차의 측정을 5회 반복실험을 수행하였다. 이들 결과의 평균치는 Fig. 4에 도시하였다. 일반적인 접촉식 프로브의 트리거링 방식은 삼점접점식(Tripod type)으로 되어 있기 때문에 세 방향으로 변화하는 형상의 프로빙오차의 결과를 얻는다.

4.2 기상측정오차 보정

측정된 오차를 앞에서 제시한 방법에 의하여 오차보정을 수행하였으며, 3차원 측정기로 동일한 공작물을 측정하고, 이를 보정된 결과와 비교하여 제시된 방법의 효용성을 검증하였다.

4.2.1 기상측정

기상측정기를 사용한 측정작업은 Fig. 6과 같이 머시닝 센터상에서 공구를 프로브로 교환하여 실시하였다. 이 때, 백래시 오차의 영향을 최소화하기 위하여 테이블의 후퇴 없이 측정하도록 프로그램 하였으며, 수동작업에 의한 오차발생을 방지하기 위하여 자동으로 측정하였다.

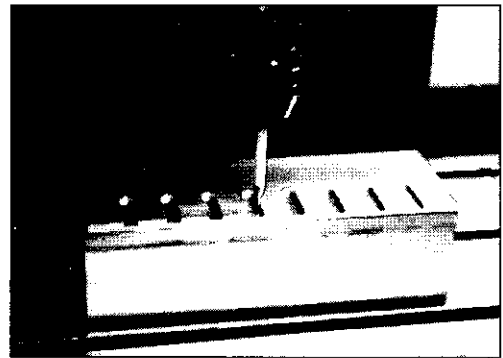


Fig. 5 Measuring process on the CNC M/C

4.2.2 CMM 상의 측정

본 실험에 사용된 3차원 측정기는 최소 분해능이 0.1 μ m이며, 일반적으로 사용되는 공작기계에 비하여 월등히 높은 정밀도를 가지고 있으므로 3차원 측정기에서 측정된 데이터를 오차가 없는 것으로 간주하고 보정을 위한 비교 기준값으로 사용하였다.

4.3 기상측정 오차보정 및 결과 분석

본 연구에서는 공작기계의 여러 오차 요소 중에서 정밀도에 가장 많은 영향을 미치는 위치결정오차에 대하여 보

정작업을 수행하였고 접촉식 프로브를 이용한 프로빙 수행시 접근각도에 따라 발생하는 프로빙오차도 보정작업을 하였다. 실험결과를 Table I과 II에 나타내었다. 공작물

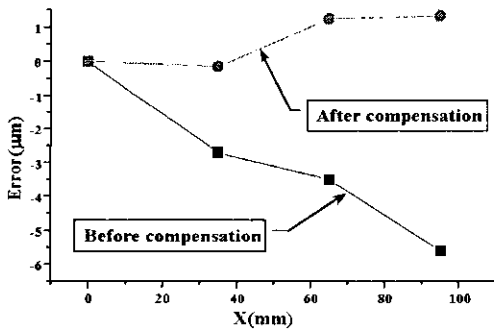
의 원점을 기준으로 하였을 때 오차보정전과 보정후의 결과를 Fig. 6-(a)와 (b)에 나타내었다. 실험결과로부터 수직형 머시닝 센터를 이용하는 기상측정 작업시 발생하는 오차가 본 연구에서 제시된 방법에 의하여 크게 개선될 수 있음이 검증되었다.

Table I X-directional error compensation

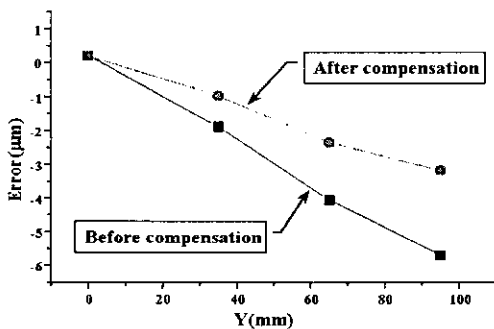
구분 X	OMM	CMM	보정전오차	보정후오차
35mm	35.032mm	35.029mm	-2.7 μ m	-0.15 μ m
65mm	65.028mm	65.025mm	-3.5 μ m	1.25 μ m
98mm	95.027mm	95.021mm	-5.6 μ m	1.34 μ m

Table II Y-directional error compensation

구분 Y	OMM	CMM	보정전오차	보정후오차
35mm	35.033mm	35.029mm	-2.7 μ m	-1.51 μ m
65mm	65.030mm	65.025mm	-5.5 μ m	-3.29 μ m
98mm	95.029mm	95.021mm	-7.6 μ m	-4.35 μ m



(a) X-direction



(b) Y-direction

Fig. 6 Results of error compensation

5. 결론

본 논문에서는 수직형 머시닝 센터의 기하학적 오차와 접촉식 프로브의 오차, 공작물 표면의 목표 측정점의 좌표 변환 등을 고려하여 폐회로 구조를 이용하여 기상측정의 측정오차를 예측하는 모델을 제시하였다. 공작기계의 오차성분의 분석을 위하여 볼바 시스템을 이용하였다. 또한 마스터링을 이용하여 접촉식 프로브의 프로빙 오차를 정량적으로 분석하여 기상측정에 의하여 얻어지는 측정좌표값의 신뢰도를 높였다. 볼바시스템을 이용하여 얻어진 공작기계의 기하학적 오차성분을 이용하여 기상측정시 발생하는 측정오차의 보정방법을 제시하였다. 본 논문에서 제시된 접근방법을 실험적으로 검증하기 위하여 실제 가공물을 기상측정과 3차원 측정기에서의 형상 측정을 동일한 조건과 동일한 측정위치에서 동시에 수행하였다. 3차원 측정기에서 측정된 형상데이터를 기준으로 하여 기상측정에서는 앞서 제시된 측정오차분석을 통하여 오차보상전과 오차보상후의 두 가지 경우에서 가공물의 측정을 수행하였다. 이들 측정값의 비교를 통하여 측정오차보상이 기상측정값의 정밀도를 크게 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 1999년도 인하대학교 박사후과정 연구비에 의하여 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) 남우선, 정성종, "3차원 자유곡면 언더머신 측정 및 검사 시스템의 개발," 한국정밀공학회 추계학술대회, pp. 911~914, 1997.
- (2) 박희재, "정밀도 성능평가를 위한 3차원 측정기 수치모델 개발," 대한기계학회논문집, 제20권, 제3화, pp.945~959, 1996.
- (3) 박희재, 김종후, "상용3차원 측정기의 전체 측정정

- 밀도 교정 및 실시간 보정시스템," 대한기계학회 논문집, 제18권, 제9호, pp. 2358~2367, 1994.
- (4) 이상준, 김선호, 김옥현, "OMM시스템에서의 측정 오차 해석," 한국정밀공학회지, 제15권, 제5호, 1998.
 - (5) 조명우, 이세희, 서태일, "CAD/CAM/CAI 통합에 기초한 자유곡면의 On-Machine Measurement : I. 측정오차 모델링," 한국정밀공학회지, 제16권, 제10호, 1999.
 - (6) Balsamo, A., "Effects of Arbitrary Coefficients of CMM Error Maps on Probe Qualification," *Annals of the CIRP*, Vol. 44/1/1995, pp. 475~478.
 - (7) Chatterjee, S., "An Assessment of Quasi-Static and Operational Errors in NC Machine Tools," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol.16, No.1, pp. 59~68, 1997.
 - (8) Chen, X., B., Geddam, A., Yuan, Z., J., "Accuracy Improvement of Three-Axis CNC Machining Centers by Quasi-Static Error Compensation," *Journal of Manufacturing systems*, Vol. 16, No. 5, pp. 323~336, 1997.
 - (9) Cho, J.H. Cho, M.W. and Kim, K., "Volumetric Error Analysis of a Multi-axis Machine Tool Machining a Sculptured Surface Workpiece," *International Journal of Production Research*, Vol.32, No.2, pp. 345~363, 1994.
 - (10) Ferreira, P.M. and Richard Liu, C., "A Method for Estimating and Compensating Quasi-static Errors of Machine Tools," *Journal of Engineering for Industry*, Vol.115, Feb., 1993.
 - (11) Huang, P., S., Ni, J., "On-line Error Compensation of Coordinate Measuring Machines," *Int. J. Mach. Tools Manufact.* Vol. 35, No. 5, 1995.
 - (12) J. S. Chen, J. X. Yuan, J. Ni, S. M. Wu, "Real-time Compensation for Time-Variant Volumetric Errors on a Machining Center," *Journal of Engineering for Industry*, Vol.115, Nov., 1993.