

## 열변형 오차를 고려한 기상측정 오차 보정에 관한 연구

박규백\*, 송길홍, 조명우(인하대 기계공학과), 권혁동, 서태일(한국생산기술연구원)

### A study on the OMM error compensation considering the thermally induced errors

K.B. Park, G.H. Song, M.W. Cho (Inha University), H.D. Kwon and T. I. Seo(KITECH)

#### ABSTRACT

Improvement of measuring accuracy is an essential part of quality control manufacturing process. The OMM is less than the CMM in measure accuracy but the OMM system is more efficient, easier to use than other measurement system. About 40 ~ 70% of the machine tool errors are induced by the thermal errors. Therefore, a key requirement for improving the measuring accuracy is to reduce the geometric and thermal errors. Thermal errors are measured by a ball bar system and predicted by the thermal error modeling. Furthermore, using the pre-defined thermal error map approach compensates the geometric accuracy of the OMM. Appropriate experiments are performed using ball-bar system, temperature measuring devices and touch-type probe. Compensated results are compared with those obtained using CMM to verify the proposed methods.

**Key Words :** OMM (On- Machine Measurement 기상측정), Compensation (보상), Thermal error (열변형 오차)

#### 1. 서론

최근 자동차, 항공기, 공작기계, 반도체 등 공업 제품의 고기능 고품질화가 요구되면서 모기계 (mother machine)인 공작기계의 고정도화에 대한 요구가 증대되면서 공작기계의 성능 향상을 위해 오차보정 기술에 대한 연구가 활발히 진행 중이며 정밀한 오차측정이 필수적이다.

일반적인 CNC 공작기계의 오차는 공작기계 부품과 구조물의 기하학적인 오차, 구조물의 온도의 상승으로 인한 열팽창, 절삭력에 의한 변형, 컨트롤러의 서보오차, NC 보간에 있어서의 오차 등에 기인한다. 이 중에서 기하학적인 오차와 열팽창에 의한 열변형 오차가 큰 비중을 차지하여 기하학적인 오차는 생산의 조립과 부품의 노화, 마모, 자중에 의한 변화등에 기인하고, 열변형 오차는 모터, 베어링과 너트, 유압시스템, 대기 온도 등과 같은 내부적 또는 외부적인 열원에 기인하는 것으로, 전체 오차의 약 40~70%를 차지한다고 알려져 있다.

가공된 형상의 고정밀도 측정을 위하여 컴퓨터로 제어되는 3 차원측정기 (CMM: Coordinate Measuring Machine)가 널리 쓰이고 있으나, 3 차원 측정기를 사용하는 측정작업은 가공이 완료된 제품의 측정은 고정도로 수행할 수 있으나, 공작기계에서 가공이 끝난 제품을 3 차원 측정기의 테이블로 이

동시켜 측정하기 때문에, 이동 및 초기 설정을 포함한 전체적인 측정시간의 증가로 생산성 저하의 원인이 되며, 고가의 측정기를 사용하여야 하므로 고비용이 발생된다는 단점이 있다. 또한 가공 중에 있는 공작물의 형상 정밀도 측정이 요구되는 경우에는, 측정 후 다시 공작기계에 고정할 때 오차가 발생하여 제품의 정밀도를 저하시키는 요인이 될 수도 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 하나의 방법으로 CNC 공작기계에서 일련의 가공이 완료된 후, 공구를 측정용 프로브로 교환하여 가공물의 정밀도를 자동으로 측정하여 형상 정밀도를 판별하는 OMM 방법이 사용되고 있다. 그러나, 가공용 공작기계의 정밀도는 일반적으로 3 차원 측정기에 비하여 낮기 때문에, OMM 에 의한 측정결과는 3 차원 측정기에 의한 것보다 정밀도가 좋지 않게 된다. 하지만 공작기계 전체 오차의 40~70%를 차지 하는 열변형 오차를 보정하여 측정을 수행한다면, 측정을 위해 이동하는 번거로움과 시간뿐만 아니라 한 장비만을 사용하여 유지 보수에도 상당한 이점이 있다.

따라서 본 논문에서는 CNC 공작기계의 열변형 오차를 측정하고, 이를 회귀분석에 의한 통계학적 방법으로 모델링하여 OMM 에 의한 측정시 발생하는 오차를 보정하고자 하였으며, 이를 3 차원 측정기에 의한 측정결과와 비교하였다.

## 2. 공작기계 오차 모델링

3 축 공작기계는 일반적인 21 개 기하학적 오차 외에도 열변형에 의한 11 개의 오차를 추가 할 수 있다. 기하학적 오차는 각 축에 대하여 3 개의 병진오차와 3 개의 회전오차, 그리고 두 축사이의 직각도 오차이다. 열변형 오차는 공구 끝에서의 5 개의 오차(3 개의 드리프트 오차, 2 개의 틸트 오차)에 각 축사이의 상태적인 원점이동 오차 6 개가 추가된다. 이러한 수직형 공작기계의 모든 오차요소를 합성한 체적오차 합성모델 (volumetric error synthesis model)을 동차변환 행렬(homogeneous transformation matrix)로 유도하였다.

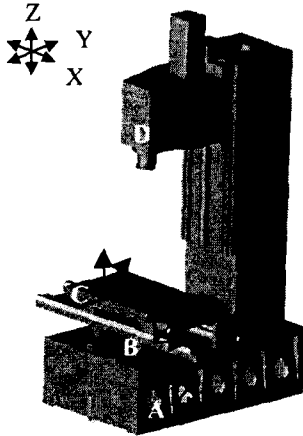


Fig.1 Machine coordinate system

$$\vec{T}_A(t) = \tau_A^D \vec{T}_D(t) \quad (1)$$

$$(\vec{W} + \Delta \vec{W})_A = \tau_A^B \tau_B^C (\vec{W} + \Delta \vec{W})_C \quad (2)$$

$$\tau_A^D \vec{T}_D(t) = \tau_A^B \tau_B^C (\vec{W} + \Delta \vec{W})_C \quad (3)$$

결과적으로 공작물 오차 벡터  $\Delta \vec{W}_C$  는 식(3)을 이용해서 풀 수가 있다.

$\vec{T}_A(t)$  : 좌표계 A 에서 공구팁의 벡터

$\vec{T}_D(t)$  : 좌표계 D 에서 공구팁의 벡터

$\tau_A^D$  : 슬라이더 좌표계 D 에서 슬라이더 좌표계 A 로의 변환

$(\vec{W} + \Delta \vec{W})_A$  : 좌표계 A 에서 공작물의 이상 차원 벡터  $\vec{W}_A$  와 오차벡터  $\Delta \vec{W}_A$

$\tau_A^B$  : 슬라이더 좌표계 B 에서 슬라이더 좌표계 A 로의 변환

$\tau_B^C$  : 슬라이더 좌표계 C 에서 슬라이더 좌표계 B 로의 변환

$(\vec{W} + \Delta \vec{W})_C$  : 좌표계 C 에서 공작물의 이상 차원 벡터  $\vec{W}_C$  와 오차벡터  $\Delta \vec{W}_C$

이상적인 공작물 좌표계를 식 (3)으로부터 다음과 같이 풀 수가 있다.

$$\begin{aligned} \Delta x &= \Delta x_t + \Delta x_g \\ &= \Delta S_x - \Delta y x_t + \Delta y z_t - EX(X) - EX(Y) + EX(Z) - E_{ys}L \\ &\quad + EC(Z)T_y + EB(Z)(T_z - D) + EC(X)(Oy_z - Oy_x + T_y - y) \\ &\quad + EC(Y)(Oy_z + T_y - y) + EB(X)(Oy_z - Oy_x - T_z - L - z) \\ &\quad + EB(Y)(L - Oy_z - T_z - z) - ES(Z)Xz \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta y &= \Delta y_t + \Delta y_g \\ &= \Delta S_y - \Delta y x_t + \Delta y z_t - EX(X) - EX(Y) + EX(Z) + E_{ys}L \\ &\quad + EC(Y)(-Oy_z - T_x) + EC(Z)T_x + EC(X)(Oy_z - Oy_x - T_x \\ &\quad + EA(Y)(Oy_z + T_z - L + z) + EA(X)(Oy_z - Oy_x + T_z - L + z) \\ &\quad + EA(Z)(L - T_z) + ES(X)Yx - ES(Y)Zz \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta z &= \Delta z_t + \Delta z_g \\ &= \Delta S_z - \Delta y x_t + \Delta y z_t - EZ(X) - EZ(Y) + EZ(Z) - EB(Z)T_x \\ &\quad + EB(Y)(Oy_z + T_x) + EA(Z)T_y + EB(X)(Oy_z - Oy_x + T_x - \\ &\quad + EA(Y)(-Oy_z - T_y + y) + EA(X)(Oy_x - Oy_y - T_y + y) \end{aligned}$$

여기서

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$  : X 축 슬라이드 시스템 C 에서 공작물 좌표

$T_x, T_y, T_z$  : 스피들 캐리어 좌표계 D 에서 표준 공구물의 좌표

L : 공구교환 시 공구 Offset 길이

$x, y, z$  : X, Y, Z 축 좌표계에서 각 슬라이더 이동거리

$\Delta x_g, \Delta y_g, \Delta z_g$  : 각 방향 공작기계 기하학적 오차

$EX(X), EY(Y), EZ(Z)$  : X, Y, Z 축 방향 선형변위 오차

$EY(X), EZ(X), EX(Y), EZ(Y), EX(Z), EY(Z)$  : 진적도 오차

$Oy_x, Oy_y, Oy_z$  : Y 축 원점  $Oy$  에 대한 X 축 원점  $Ox$  의 세방향 거리

$EA(X), EB(Y), EC(Z)$  : X, Y, Z 축 방향의 롤 오차

$EB(X), EC(X), EA(Y), EC(Y), EA(Z), EB(Z)$  : 각도오차

$ES(XY), ES(YZ), ES(ZX)$  : 두 축사이의 직각도 오차

$\Delta x_t, \Delta y_t, \Delta z_t$  : 각 방향 공작기계 열변형 오차

$\Delta S_x, \Delta S_y, \Delta S_z$  : 표준공구 팁에서 X, Y, Z 축 방향으로의 스피들 드리프트

$E_{xs}, E_{ys}$  : X, Y 축 방향의 스피들 틸트

$\Delta yx_x, \Delta yx_y, \Delta yx_z$  :  $Oy$  에 대한 원점  $Ox$  의 세 방향으로의 원점 열변형

$\Delta yz_x, \Delta yz_y, \Delta yz_z$  :  $Oy$ 에 대한 원점  $Oz$ 의 세 방향으로의 원점 열변형

### 3. 실험장치

#### 3.1 온도측정 시스템

실험은 수직형 머시닝센터(HiMac- V 100, 현대)에서 시행되었다. 공작기계의 열변형 오차를 측정하기 위하여 측정 정밀도  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 인 "T" 타입 열전대를 장착하였으며, 본 연구에 사용된 센서의 부착 위치를 Fig. 2에 나타내었다. X-Y 평면에 대한 열변형을 측정하기 위해 가이드 웨이, 베어링, 리니어 스케일에 각각 하나씩의 열전대를 부착하였고, 주축인 스피들 부위에 3개, 주변 공기온도를 측정하기 위한 온도센서를 1개 부착하여 총 10개의 온도센서를 부착하였다. 그림에 나타난 바와 같이 센서 T1은 Y-Slide, T2는 X-Bearing, T3는 X-Slide, T4는 Y-Bearing, T5는 Y-Scale, T6는 X-Scale, T7은 대기온도 측정을 위한 센서이다. T8, T9는 스피들, T10은 스피들 하우징에 센서를 부착하였다. 시간에 대한 온도의 변화는 CNC에 부착된 열전대를 통하여 Data acquisition system에 저장된다.

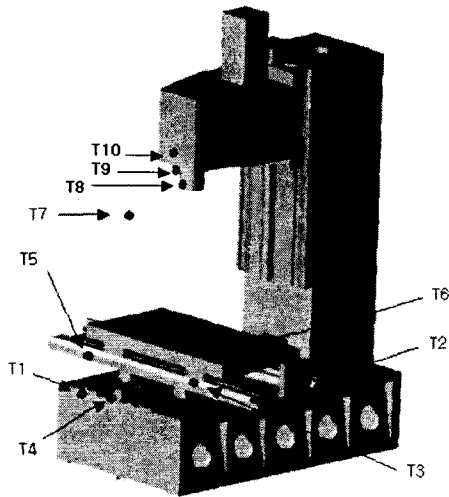


Fig. 2 Temperature measurement sensor locations

#### 3.2 볼바 시스템

본 연구에서 오차측정을 위하여 사용된 기구볼바 측정 시스템은 크게 기구부, sensor interface 부, 운영 소프트웨어로 구성되며, RS232C 통신을 이용하여 자동으로 구동할 수 있다. 기구볼바의 기구부는 두개의 Ball과 센서, 센서를 내장한 Bar로 구성되며, 한 개의 Ball은 Bed에 고정되어 기계가 원

호 보간 운동을 수행하는 동안 두 개의 Ball 사이의 거리를 측정한다. 본 연구에서는 공칭길이 100mm의 기구볼바를 사용하였으며 정확한 길이 교정을 위해 인바(Invar)로 제작한 Calibartor를 사용하였다. 센서부는 capacitive sensor인 digital probe를 사용하였으며, 분해능은  $0.1\mu\text{m}$ 이다.

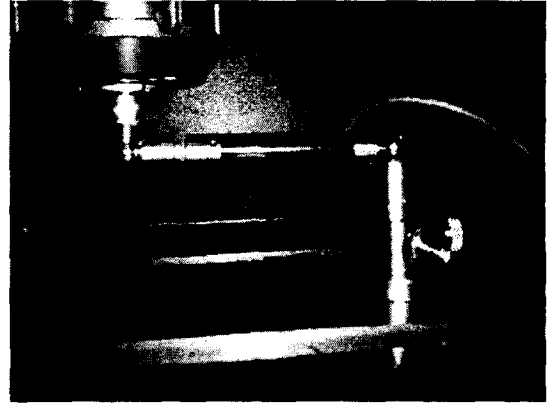


Fig. 3 Ball bar system

### 4. 실험방법

기본적으로 X-Y 평면에 대하여 가동 중 공작기계 각 부분의 온도를 체크하고 그 순간의 기하학적 오차를 측정하였다. 온도측정 전 공작기계 워밍업을 speed over ride 10% 상태에서 2시간, 50% 상태로 1시간 X-Y 평면을 예열 시킨 후 온도측정에 들어갔다.

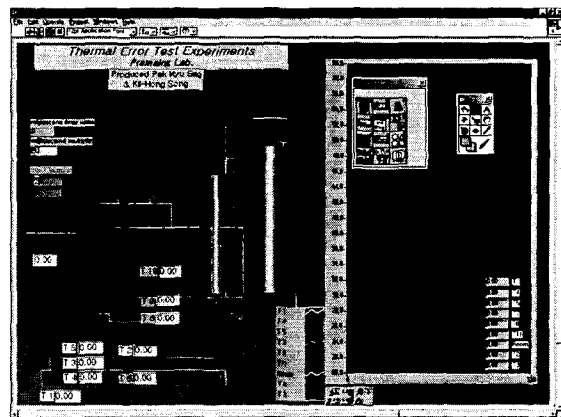


Fig. 4 Thermal error experiments in web view

전체적인 가동은 1시간 이송과 10분 측정을 기본으로 하였다. Feed rate는 4000mm/분으로 하고 전 구간을 반복적으로 움직여 기계의 온도를 상승시켰

다. 공작기계의 각 부분에 부착된 온도센서를 이용하여 온도 데이터를 얻을 수 있었으며 각 데이터는 web view 를 통하여 실시간으로 측정 및 저장을 하였다. 1 시간 이송 이후 공작기계를 정지하고 볼바를 이용하여 오차를 측정하였는데, 이 측정에 약 10 여분이 소요 되었으며 feed rate 은 490mm/분 이다. 전체 8 시간을 운전하여 측정을 실시 하였다.

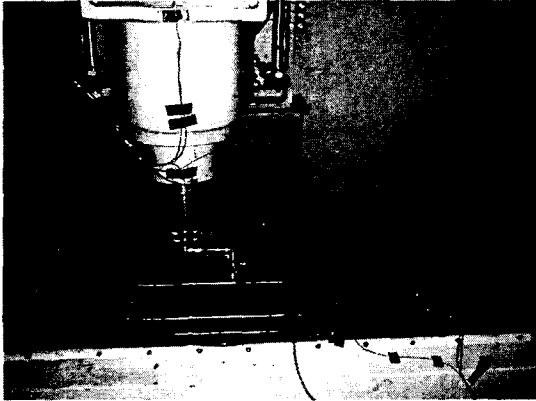


Fig. 5 Temperature measurement system and ball bar

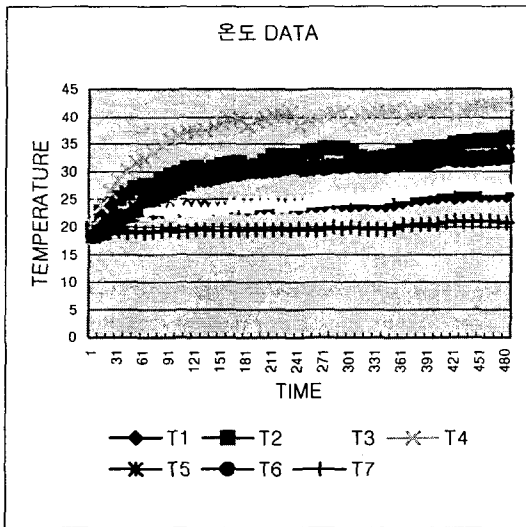


Fig. 6 Temperature change in CNC

## 5. 결과 및 고찰

### 5.1 실험결과

Fig. 6 은 앞에서 언급한 바와 같이 X, Y 축을 동시에 8 시간 움직인 경우에 대한 열변형량을 측정 한 결과이다. 온도의 변화는 무부하 상태에서 최초 실내온도 19℃에서 시작하여 시간이 경과할수록 온

도가 상승함을 볼 수 있다.

하나의 축에 부착된 온도 센서 중 가장 온도 변화가 심한 부분은 베어링 부분이다. T4는 Y 축 베어링 T2는 X 축 베어링의 온도를 나타낸다.

시간에 따른 기하학적 오차를 살펴보면 Positional Error 가 가장 크며 12.4 $\mu$ m 로 나타났다. 또한 직각도 오차나 진직도 오차보다 XY 직각도 오차가 큰 오차량을 보이고 있다. 이것은 곧 열변형 오차의 영향은 기하학적 오차 가운데 각도오차와 진직도 오차에는 별 영향을 미치지 않고, 선형 변위 오차의 기울기의 변화에는 영향을 미친다고 할 수 있다.

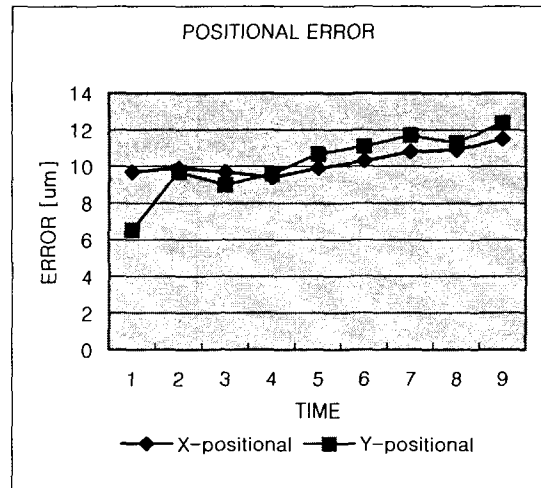


Fig. 7 Positional error

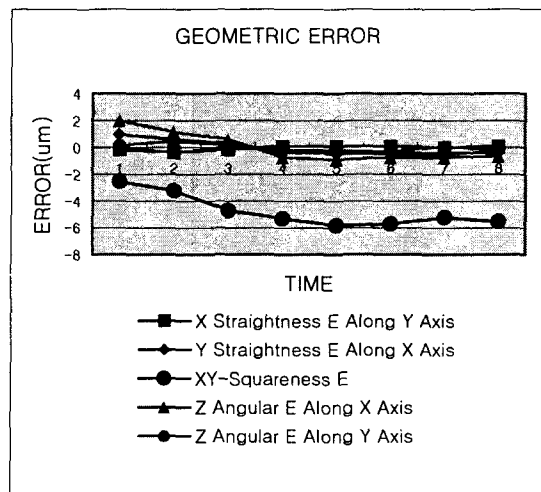


Fig. 8 Geometric error

## 5.2 열변형 오차 모델링

이송축과 관계된 열변형 오차는 온도와 이송축의 위치를 동시에 고려해야 하는데 모두 21 개의 오차 중에서도 직각도 3 개는 순수하게 온도에 의존하는 오차이고, 나머지 18 개의 오차는 각 이송축의 위치와 동작기계의 온도와 관계되는 것이다.

오차항을 다음과 같이 구분할 수 있다.

$$Error(P, T) = Error_g(p) + Error_i(T) \quad (4)$$

P: 이송축의 위치

T: 동작기계 구조물의 온도

$Error_g(P)$  : 기하학적 오차, 이송위치에 의존하는 함수

$Error_i(T)$  : 열변형 오차와 관계되는 함수로 정의

$$\begin{aligned} Error_g(P) &= a_0 + a_1 P + a_2 P^2 + \dots \\ Error_i(T) &= m_1(T) \times P + m_2 T \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $a_0, a_1, \dots$ 는 기하학적 오차와 관계되는 계수이고,  $m_1(T)$ 는 열변형 오차항의 이송축에 대한 기울기 값이며,  $m_2(T)$ 는 온도에 대한 1 차 다항식이다.

앞에서 정의한 동작기계 오차를 프로그램화 하여 8 시간에 걸친 X 축과 Y 축의 오차량을 구할 수 있었다. 각 축에 대한 오차량은 각 축의 온도센서에 대하여 영향을 받는 값들이므로 다중회귀분석(multiple regression analysis)을 이용하여 모델링을 수행하였다.

X 축의 시간에 따른 오차량과 X 축에 부착한 온도센서 T2, T3, T6의 측정값에 의해 열변형 오차 함수  $Error_i(T)$ 를 다음과 같이 얻을 수 있었으며, 기하학적 오차 함수인  $Error_g(P)$ 도 Ball Bar를 이용하여 얻은 데이터로 다음과 같이 구할 수 있었다.

$$Error_i(T) = -0.3072 \times T2 - 0.18446 \times T3 + 0.453787 \times T6 - 9.3807$$

$$Error_g(P) = -5.5 + 0.0755P + 1.9375 \times 10^{-4} P^2 + 1.2917 \times 10^{-7} P^3 \quad (6)$$

최종적으로 X 축에 대한 모델링 식은 다음과 같다.

$$Error(P, T)_x = -5.5 + 0.0755X + (-0.3072 \times T2 - 0.18446 \times T3 + 0.453787 \times T6 - 9.38074) X$$

위 식에서 값이 적은  $a_2$ 와  $a_3$ 는 생략하였고, X 축과 마찬가지로 Y 축에 대한 모델링도 계산이 가능하다.

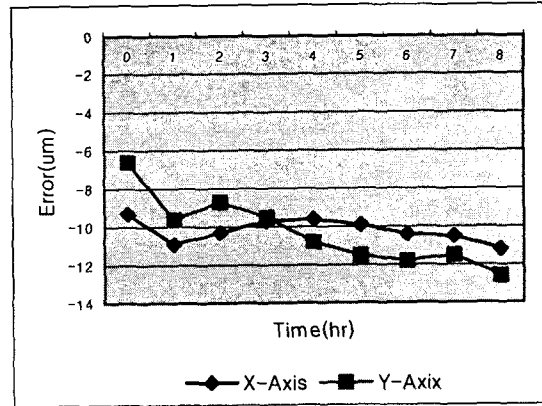


Fig. 9 Thermal error variations

## 6. 기상측정 오차의 보정

이상과 같은 실험결과를 기초로 하여 CNC 동작기계를 이용한 기상측정 결과를 보정하여 3 차원 측정기의 측정결과와 비교하였다. 측정결과를 비교를 위하여 Fig. 10에 나타낸 NAS 979 시편을 가공하여 사용하였으며, 동일오차의 반복을 피하기 위하여 기상측정에 사용된 것과는 다른 CNC 머시닝 센터를 이용하여 가공하였다.

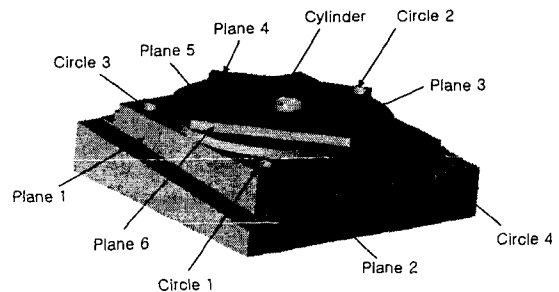


Fig. 10 NAS 979 specimen

### 6.1 프리 트래블링 오차의 측정

본 연구에서 사용된 접촉식 프로브는 접촉방향에 따라서 신호를 발생시키기 위한 변위가 변화한다. 따라서, 본 연구에서는 기준구를 이용하여 이에 대한 보정을 수행하였으며, Fig. 11에 측정된 프리 트래블링 오차를 나타내었다.

### 6.2 기상측정 오차의 보정

본 연구에서 사용된 NAS 시편은 그림에서 보는 바와 같이 여러 개의 원과 원통, 평면 등으로 구성되어 있다. 따라서, 측정결과에 대한 보정은 각 요소에

대하여 진원도, 평면도 등을 측정하여 이를 3 차원 측정기를 이용하여 측정한 값과 보정 전과 후를 비교하였다. Table 1-3 은 이러한 결과를 나타내고 있다.

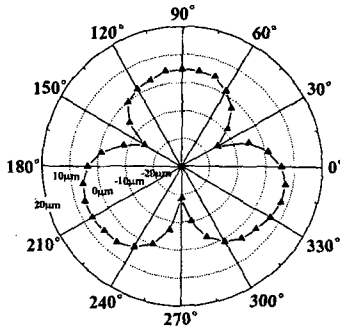


Fig. 11 Pre-traveling variation according to roll angle

Table 1. Compensation results of circularity for circles

|    | CMM (mm) | OMM (mm) | Error1 (µm) | Error2 (µm) | Ratio (%) |
|----|----------|----------|-------------|-------------|-----------|
| C1 | 0.0008   | 0.0271   | -26         | -11         | 42.3      |
| C2 | 0.0077   | 0.0101   | -24         | -13         | 54.1      |
| C3 | 0.0003   | 0.0275   | -27         | -11         | 40.7      |
| C4 | 0.0319   | 0.0673   | -35         | -18         | 51.4      |

Table 2. Compensation results of cylindricity for cylinders

|          | CMM (mm) | OMM (mm) | Error1 (µm) | Error2 (µm) | Ratio (%) |
|----------|----------|----------|-------------|-------------|-----------|
| Cylinder | 0.0125   | 0.0216   | -9          | -2          | 22.2      |

Table 3. Compensation results of flatness for planes

|    | CMM (mm) | OMM (mm) | Error1 (µm) | Error2 (µm) | Ratio (%) |
|----|----------|----------|-------------|-------------|-----------|
| P1 | 0.0072   | 0.0225   | -15         | -6          | 40.0      |
| P2 | 0.0371   | 0.0527   | -15         | -7          | 46.6      |
| P3 | 0.0287   | 0.0052   | 23          | 11          | 47.8      |
| P4 | 0.0142   | 0.0356   | -21         | -7          | 33.3      |
| P5 | 0.0067   | 0.0304   | -23         | -10         | 43.4      |
| P6 | 0.0100   | 0.0429   | -32         | -13         | 40.6      |

## 7. 결론

본 논문에서는 공작기계에서 나타날 수 있는 오차를 기하학적 오차와 열변형 오차로 구분한 후 기구불바를 이용하여 기하학적 오차를 측정하였고, 온도센서를 이용하여 기계 각 부분의 온도변화를 파악하였다. 이를 토대로 선형회귀법을 이용하여 모델링을 수립하였다.

본 연구의 결과로 3 차원 측정기에 비하여 정밀

도가 상대적으로 낮은 CNC 공작기계에 의한 기상 측정 결과의 오차보정이 가능할 것으로 사료되며, 모델링된 결과를 실제 시편에 적용하여 3 차원 측정기의 측정결과와 비교한 결과 상당한 측정 정밀도의 향상을 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

## 참고문헌

1. J. B. Bryan, "A simple method for testing measuring machine tool", *Precision Engineering*, 4(2), pp 61~69, 1982
2. N. Abarakat et al., "Kinematic and geometric error compensation of a coordinate measuring machine", *Int. J. Machine Tools and Manufacture*, pp 833~850, 2000.
3. Chen, J. S., Yuan, J. X., Ni, Jun, and Wu, S. M., "Real time Compensation of Time variant Volumetric Error on a Machining Center", *Sensor, Control, and Quality Issues in Manufacturing*, ASME, pp 241~253, 1991
4. H. J. Park, S. W. Lee, K. I. Lee, Y. J. Cho, "Thermal error measurement and modeling techniques for the 5 degree of freedom spindle drift in CNC machine tools", *Journal of Mechanical Engineering Science*, 24(5), pp 1343-1351, 2000
5. Seung-Han Yang, "Statistical optimization and assessment of a thermal error model for CNC machine tools", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, pp 147-155, 2001
6. W. Knpp. Test of Three Dimensional Uncertainty of machine Tools and Measuring Machines and its relation to the machine errors, *Annals of CIRP*, Vol. 32. No.1, pp 459~464, 1983.
7. 양승한, "수평 머시닝 센터의 준 정적 오차의 실시간 보정," *한국정밀공학회지*, 제 14 권, 제 11 호, pp 154~162, 1997.
8. 양승한, 김기훈, "반구상의 볼바측정을 통한 스펀들 열변형 오차측정", *대한기계학회 논문집*, 제 25 권, 제 9 호, pp 1359~1367, 2001.
9. 문준희, 박희재, 주중남, "기구불바를 이용한 공작기계의 오차평가 시스템 개발", *정밀공학회지*, 95년도 추계학술대회논문집, pp 336-342, 1995.