

# 기상계측 시스템을 이용한 머시닝센터의 열변형 오차 모델링 및 오차측정

이재종\*, 양민양\*\*

## Modeling and Measurement of Thermal Errors for Machining Center using On-Machine Measurement System

Jae-Jong Lee\* and Min-Yang Yang\*\*

### ABSTRACT

One of the major limitations of productivity and quality in metal cutting is the machining accuracy of machine tools. The machining accuracy is affected by geometric errors, thermally-induced errors, and the deterioration of the machine tools. Geometric and thermal errors of machine tools should be measured and compensated to manufacture high quality products. In metal cutting, the machining accuracy is more affected by thermal errors than by geometric errors. This paper models of the thermal errors for error analysis and develops on-the-machine measurement system by which the volumetric error are measured and compensated. The thermal error is modeled by means of angularity errors of a column and thermal drift error of the spindle unit which are measured by the touch probe unit with a star type styluses and a designed spherical ball artifact (SBA). Experiments, performed with the developed measurement system, show that the system provides a high measuring accuracy, with repeatability of  $\pm 2\mu\text{m}$  in X, Y and Z directions.

It is believed that the developed measurement system can be also applied to the machine tools with CNC controller. In addition, machining accuracy and product quality can be improved by using the developed measurement system when the spherical ball artifact is mounted on the modular fixture.

**Key Words :** Key Words : On-Machine Measurement(기상계측), Spherical Ball Artifact (구 측정구), Thermal Error (열변형 오차)

### 1. 서론

고정도 및 고품질을 가진 제품을 가공하기 위해서는 제품의 품질 및 정밀도에 직접적인 영향을 미치는 공작기계가 가지고 있는 기하오차와 절삭 가공 중에 발생하는 진동, 열, 절삭력에 의해 발생하는 오차를 신속하게 측정하여 보정해야 한다. 공작기계에서 발생하는 오차는 오차의 형태에 따

라 정적오차(quasi-static error)와 동적오차(dynamic error)로 구분한다. 동적오차는 기계의 진동, chatter 및 스피들 유니트의 진동에 의해서 발생하는 오차이고, 정적오차는 공작기계의 구성요소인 안내면(guide way), 칼럼, 볼 스크류 등 구조계의 조립특성에 따른 기하오차(geometric error)와 절삭 가공 중에 발생하는 다양한 열원인 절삭열, 모터의 발생열, 이송축의 마찰열 및 주위 온도변화

\* 한국기계연구원 자동화연구부

\*\* 한국과학기술원 기계공학과

에 의해서 발생하는 열변형 오차(thermal error or thermally induced error)로 구분한다. 정적오차는 공작기계의 구조계, 이송계, 주축계의 변형을 유발시킴으로써 공작기계의 가공정도에 직접적인 영향을 미쳐 가공정도를 저하시킨다<sup>4,6)</sup>. 특히, 절삭가공 중에 발생하는 이송축, 스핀들 유니트, 모터 등의 열원에 의해서 나타나는 열변형 오차는 공작기계의 기하오차에 비해서 가공정도에 큰 영향을 미치며, 공작기계에서 발생하는 오차의 40~70%는 열변형 오차에 의해서 발생한다<sup>6)</sup>. 또한, 절삭가공 중에 발생하는 다양한 열원에 의해서 시시각각으로 변하기 때문에 고정도 가공을 위해서는 열변형 오차를 최소화시켜야 한다.

열변형 오차와 관련된 연구는 크게 공작기계 구조설계 관점에서 다양한 형태의 발생열을 최소화하여 가공정도를 높이기 위한 연구와 열변형 오차를 측정하여 보정하는 연구가 주로 이루어지고 있으며, 열변형 오차는 최적설계를 하더라도 피할 수 없기 때문에 측정하여 보정하는 연구가 반드시 필요하다<sup>6)</sup>. 이외에 온도변화에 따른 열변형 오차를 신속하게 예측하여 보정하기 위한 방법으로 온도와 변위와의 관계 모델을 이용한 회기분석법과 신경회로망<sup>11-2,5)</sup>을 이용한 연구도 있다. 그러나, 공작기계의 정적오차는 X, Y, Z축 방향의 3차원 공간상에서 다르게 나타나고, 특히, 열변형 오차는 비선형 특성을 가지고 있으며, 시간에 따라 지배적인 영향을 받기 때문에 정확한 오차측정 및 오차 보정을 위해서는 작업 중에 신속한 오차를 측정해야 한다.

이러한 관점에서 본 논문에서는 접촉식프로브를 이용하여 기상(on-machine)계측 방법으로 공작기계의 열변형 오차를 신속하게 측정할 수 있는 시스템을 제안했다. 또한, 제안된 기상계측 시스템을 이용하여 작업 공간상에서 존재하는 열변형 오차를 측정/해석할 수 있는 열변형 오차모델을 제시했고, 제시된 오차모델을 이용하여 오차측정 실험을 수행했다. 제안된 시스템은 신속한 측정을 할 수 있어 측정으로 인한 절삭작업의 제약 및 측정시간을 최소화하면서, 동시에 높은 신뢰성을 가지고 공작기계의 오차를 측정할 수 있다.

## 2. 열변형 오차 모델링

### 2.1 오차 모델식

공작기계 및 공작기계 주위의 온도변화에 의해 발생하는 열변형 오차는 비선형의 특성을 가지고 있고, 스핀들 유니트, 볼 스크류, 칼럼 등 공작기계 구성요소의 서로 다른 온도특성에 의해 영향을 받기 때문에 정량적인 해석이 어렵다. 공작기계의 위치오차와 각변위 오차가 시간에 따른 지수 특성을 가지고 있고, 위치에 따른 선형이라고 가정하여 열변형 오차를 수학적으로 모델링한 연구도 있으나 오차모델의 변수를 구하기 위해서 상당히 많은 측정값이 필요하다<sup>7)</sup>.

본 연구에서는 공작기계의 열변형 오차를 기계상에서 측정/해석하기 위해서 공작기계의 스핀들 유니트, 칼럼 및 볼 스크류의 열원이 발생했을 때 구 측정구에서 측정된 칼럼의 각변위 오차와 스핀들 유니트의 온도변화에 의한 오차(drift error)를 이용하여 공작기계의 열변형 오차를 모델링했다.

공작기계의 열변형 오차는 스핀들 유니트의 열변형 오차  $\delta_{spindle}$ , 칼럼의 열변형 오차  $\delta_{column}$  및 볼 스크류의 열변형 오차  $\delta_{screw}$ 에 의해서 영향을 받고, 각각의 오차는 공간상의 위치에 따라서 다르기 때문에 열변형 오차는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta_{in} = f(\delta_{spindle}(x, y, z), \delta_{column}(x, y, z), \delta_{screw}(x, y, z)) \quad (1)$$

볼 스크류의 열변형 오차는 공작기계 구동부의 반복적인 이송에 의해 발생하는 볼 스크류의 축과 너트의 마찰열에 의해서 주로 발생한다. 수평형 머시닝센터의 칼럼은 좌우대칭 구조를 가지고 있고, 머시닝센터의 구조적인 영향으로 스핀들 유니트의 열원이 발생했을 때 칼럼은 열원의 열전도에 의해서 Fig.1과 같이 XY, YZ, XZ 평면상에서 각변위 형태로 나타나고, 이런 각변위는 공간상에서 칼럼의 위치에 따라서 다르게 나타난다. 또, 스핀들 유니트의 열변형 오차는 스핀들 유니트의 축 방향으로 진행된다.

따라서, 공간상의 임의의 점  $x_i, y_i, z_i$ 에서 칼럼이 YZ, XZ, XY 평면으로 각각  $a_{xi}, a_{yi}, a_{zi}$ 만큼의 각변위 오차가 존재하고, 볼 스크류의 열변형 오차  $\delta_{xi}, \delta_{yi}, \delta_{zi}$ , 스핀들 유니트의 온도변화에 의한 오차(spindle drift)  $\delta_{sp}$ 가 발생하면, 형상창성

함수의 동차변환행렬  $A_i^{i+1}$ 를 이용하여 공작기계 구조물의 실제 위치벡터  $P_{actual}$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

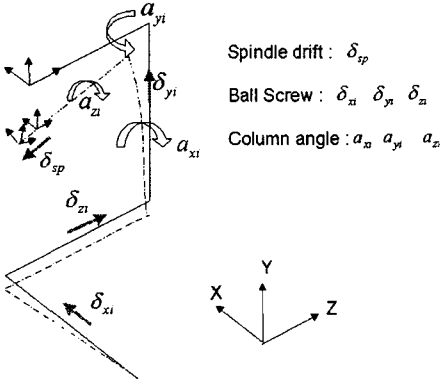


Fig. 1 Deformation pattern of the horizontal machining center

$$\begin{aligned}
 P_{actual} &= A_0^1 \cdot A_1^2 \cdots A_{n-1}^n P_{ref} \\
 &= A^3(\delta_{sp})A^3(-L)A^6(a_{zi})A^5(a_{yi})A^4(a_{xi}) \\
 &\quad A^2(y_i + \delta_{yi})A^3(z_i + \delta_{zi})A^1(x_i + \delta_{xi})P_{ref} \\
 &= [T]P_{ref}
 \end{aligned} \tag{2}$$

여기서,  $P_{ref} = [x \ y \ z - L]^T$ 는 열원이 없을 때의 위치벡터이고,  $A^i$ 는 동차변환행렬이다. 또,  $A^i(q)$ 에서  $i=1\sim 6$ 이며,  $i=1\sim 3$ 은 X,Y,Z축에 대한 병진운동을 의미하고,  $i=4\sim 6$ 은 X,Y,Z축에 대한 회전운동을 의미한다. 여기서 q는 각각의 운동에 대한 운동값을 의미한다. 이러한 관계로부터 열원이 발생했을 때의 공간상의 열변형 오차  $\Delta P$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \Delta P &= P_{actual} - p_{ref} = [T]P_{ref} - P_{ref} \\
 &= [\delta_{thx} \ \delta_{thy} \ \delta_{thz} \ 1]^T
 \end{aligned} \tag{3}$$

각 축의 각변위 오차가 미소하다고 가정하고, 2차 이상의 항을 무시하면,  $\cos \theta \approx 1$ ,  $\sin \theta \approx \theta$ 이고,  $[T]P_{ref}$ 는 다음과 같다.

$$[T]P_{ref} = \begin{bmatrix} 1 & -a_{xi} & a_{yi} & x_i + \delta_{xi} + (z_i + \delta_{zi})a_{xi} - (y_i + \delta_{yi})a_{zi} \\ a_{zi} & 1 & -a_{xi} & (x_i + \delta_{xi})a_{zi} + y_i + \delta_{yi} - (z_i + \delta_{zi})a_{xi} \\ -a_{yi} & a_{xi} & 1 & z_i + \delta_{zi} + \delta_{sp} + L - (x_i + \delta_{xi})a_{yi} + (y_i + \delta_{yi})a_{xi} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

따라서, 공작기계 열변형오차  $\delta_{thx}, \delta_{thy}, \delta_{thz}$ 는  $\Delta P = [T - I]P_{ref}$ 로 부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \delta_{thx} &= \delta_{xi} + (z_i + \delta_{zi})a_{yi} - (y_i + \delta_{yi})a_{zi} \\
 \delta_{thy} &= (x_i + \delta_{xi})a_{zi} + \delta_{yi} - (z_i + \delta_{zi})a_{xi} \\
 \delta_{thz} &= \delta_{zi} + \delta_{sp} - (x_i + \delta_{xi})a_{yi} + (y_i + \delta_{yi})a_{xi}
 \end{aligned} \tag{5}$$

여기서,  $x_i, y_i, z_i$ 는 임의의 공간상의 좌표값이고,  $a_{xi}, a_{yi}, a_{zi}$ 는 칼럼의 각변위 오차,  $\delta_{xi}, \delta_{yi}, \delta_{zi}$ 는 볼 스크류의 열변형 오차,  $\delta_{sp}$ 는 온도변화에 의한 스핀들 유니트의 열변형 오차이다. 따라서, 칼럼의 각변위 오차, 스핀들 유니트의 열변형 오차 및 이송축의 열변형 오차를 측정하면 공간상의 열변형 오차를 측정/해석할 수 있다.

## 2.2 칼럼, 스핀들 및 이송축의 열변형 오차

칼럼의 각변위는 측정침의 자체변형이 거의 없는 프로브의 측정침(stylus)을 상호 직교축이 되도록 구성한 십자형 프로브(star type probe)를 이용하여 측정하고, 공작기계의 작업 공간상에 설치된 구 측정구를 측정함으로써 온도변화에 따른 칼럼의 열변형 오차와 스핀들 유니트의 열변형 오차를 측정한다. 하나의 측정침을 사용하는 경우 임의의 한 점에서의 위치좌표만을 측정할 수 있는데 비해서 십자형 프로브는 측정침의 자체변형이 거의 없기 때문에 각 측정침의 측정값을 이용하여 프로브의 틀어진 각도와 위치좌표를 측정할 수 있다.

온도변화가 발생하기 전후의 십자형 프로브의 형태는 Fig.2와 같이  $P_0, P_1, P_2$ 에서  $P_0', P_1', P_2'$ 의 위치로 변하고, 십자형 프로브의 자체의 변형이 없기 때문에 강체의 동차변환행렬과 프로브 측정침의 3점의 측정좌표를 이용하여 공작기계 칼럼의 각변위 오차와 스핀들 유니트의 열변형 오차를 측정할 수 있다. 온도변화에 의해서 십자형 프로브가 X, Y, Z축에 대해서 각각  $a_{xi}, a_{yi}, a_{zi}$ 의 각변위가 발생했을 때 프로브의 변환된 위치는 강체의 동차변환행렬을 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$P_{new} = TR \cdot P_{old} \tag{6}$$

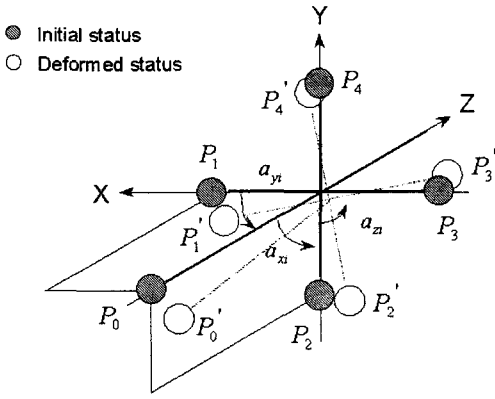


Fig. 2 Configuration of the star type probe

여기서,  $TR$ 은  $X, Y, Z$ 축의 각변위에 의한 동차변환행렬의 곱이며,  $P_{new}$ 는 온도변화가 발생한 후 프로브의 위치좌표이고,  $P_{old}$ 는 온도변화가 발생하기 전 프로브의 위치좌표이다.

$$TR = A^4(a_{xi}) \cdot A^5(a_{yi}) \cdot A^6(a_{zi}) \quad (7)$$

$$P_{new} = \begin{bmatrix} x_{n0} & x_{n1} & x_{n2} \\ y_{n0} & y_{n1} & y_{n2} \\ z_{n0} & z_{n1} & z_{n2} \end{bmatrix} \quad P_{old} = \begin{bmatrix} x_{o0} & x_{o1} & x_{o2} \\ y_{o0} & y_{o1} & y_{o2} \\ z_{o0} & z_{o1} & z_{o2} \end{bmatrix}$$

여기서,  $x_{oi}, y_{oi}, z_{oi} (i=0..2)$ 는 온도변화가 발생하기 전에 구 측정구를 측정했을 때 프로브 측정점의 측정값이고,  $x_{ni}, y_{ni}, z_{ni} (i=0..2)$ 는 온도변화가 발생한 후에 구 측정구를 측정했을 때 프로브 측정점의 측정값이다.

식(6)에 동차변환행렬과 온도변화가 발생하기 전후의 위치좌표행렬을 대입하여 정리하면 다음 식(8)과 같고,

$$\begin{bmatrix} x_{n0} & x_{n1} & x_{n2} \\ y_{n0} & y_{n1} & y_{n2} \\ z_{n0} & z_{n1} & z_{n2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{o0} - y_{o0}a_{zi} + z_{o0}a_{yi} & x_{o1} - y_{o1}a_{zi} + z_{o1}a_{yi} & x_{o2} - y_{o2}a_{zi} + z_{o2}a_{yi} \\ -z_{o0}a_{xi} + x_{o0}a_{zi} + y_{o0} & -z_{o1}a_{xi} + x_{o1}a_{zi} + y_{o1} & -z_{o2}a_{xi} + x_{o2}a_{zi} + y_{o2} \\ z_{o0} + y_{o0}a_{xi} - x_{o0}a_{yi} & z_{o1} + y_{o1}a_{xi} - x_{o1}a_{yi} & z_{o2} + y_{o2}a_{xi} - x_{o2}a_{yi} \end{bmatrix} \quad (8)$$

이 식으로부터  $x_{ni}, y_{ni}, z_{ni}$ 는 측정값이므로, 행렬내의 각각의 9개의 식으로부터 미지수인 임의

의 공간상에서의 칼럼의 각변위  $a_{xi}, a_{yi}, a_{zi}$ 를 구할 수 있다. 여기서,  $x_{oi}, y_{oi}, z_{oi}, x_{ni}, y_{ni}, z_{ni}$ 는 각 측정구의 위치에서 측정된 측정점의 위치좌표이다.

$$a_{xi} = - \frac{(y_{o2} - y_{n2})x_{o0} - (y_{o0} - y_{n0})x_{o2}}{x_{o2}z_{o0} - x_{o0}z_{o2}} \Bigg|_{i=1-4} \quad (9)$$

$$a_{yi} = - \frac{(x_{o0} - x_{n0})y_{o1} - (x_{o1} - x_{n1})y_{o0}}{y_{o1}z_{o0} - y_{o0}z_{o1}} \Bigg|_{i=1-4} \quad (10)$$

$$a_{zi} = \frac{x_{o1} - x_{n1}}{y_{o1}} \cdot \frac{[(x_{o1} - x_{n1})y_{o2} - (x_{o2} - x_{n2})y_{o1}]z_{o1}}{y_{o1}(y_{o2}z_{o1} - y_{o1}z_{o2})} \Bigg|_{i=1-4} \quad (11)$$

또, 스피들 유니트의 온도변화에 의한 오차  $\delta_{sp}$ 는 측정구가 구(spherical ball)이기 때문에 구 중심좌표의 변화를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta_{sp} = \left| \frac{P_{real} - P_{ref}}{\sqrt{(x_{n0} - x_{o0})^2 + (y_{n0} - y_{o0})^2 + (z_{n0} - z_{o0})^2}} \right| \quad (12)$$

이송축인 볼 스크류의 열변형 오차는 측정된 칼럼 및 스피들 유니트의 열변형 오차에 대한 역상값(mirror image value)을 이용한 방법을 적용하여 오차해석을 했다. 역상값을 이용한 방법은 십자형 프로브로 측정된 칼럼의 각변위 오차와 스피들 유니트의 열변형오차의 역상값을 열변형 오차 모델식에 적용함으로써 이송축에 의한 열변형 오차를 해석할 수 있다. 즉, 식(5)에 구 측정구의 각구에서 측정점  $P_0$ 에 의해 측정된 측정값과 3차원 측정기의 측정값의 차  $\delta_{thxi}, \delta_{thyi}, \delta_{thzi}$ 와 역상값을 적용하면 다음과 같다.

$$(a_{xi}, a_{yi}, a_{zi}, \delta_{sp}) \Rightarrow (-a_{xi}, -a_{yi}, -a_{zi}, -\delta_{sp})$$

$$\begin{bmatrix} \delta_{thxi} - y_i a_{zi} + z_i a_{yi} \\ \delta_{thyi} + x_i a_{zi} - z_i a_{xi} \\ \delta_{thzi} + \delta_{sp} - x_i a_{yi} + y_i a_{xi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & a_{zi} & -a_{yi} \\ -a_{zi} & 1 & a_{xi} \\ a_{yi} & -a_{xi} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{xi} \\ \delta_{yi} \\ \delta_{zi} \end{bmatrix} \quad (13)$$

이로부터 이송축의 열변형 오차  $d$ 는 다음과 같다.

$$D = A \cdot d \quad \therefore d = A^{-1} \cdot D \quad (14)$$

따라서, 구를 사용한 측정구와 십자형 프로브(star type probe : L=60mm, d=6mm)를 이용하여 온도 변화가 발생한 임의의 시간  $t$ 에서 측정된 칼럼의 각변위 오차, 스핀들 유니트 및 이송축의 열변형 오차를 측정하여 식(5)에 대입함으로써 온도변화에 따른 공간상의 열변형 오차를 측정/해석할 수 있다.

### 3. 기상계측 시스템

공작기계의 기하오차와 열변형 오차를 측정/해석하기 위해서 접촉식 프로브와 구 측정구를 이용하여 Fig.3과 같은 기상계측 시스템을 개발했으며, 개발한 시스템은 구 측정구, 온도측정장치, 접촉식 프로브, 공작기계 인터페이스 유니트와 측정결과 해석을 위한 오차해석 소프트웨어로 구성되어 있다.

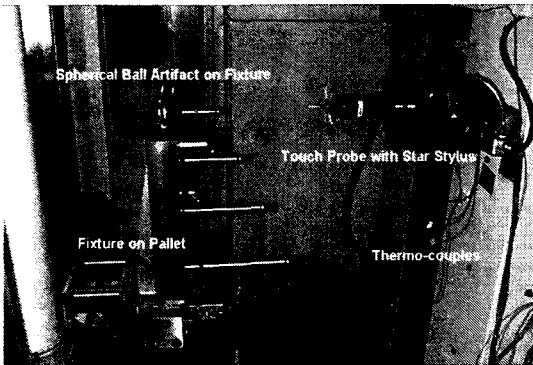


Fig. 3 Experimental set-up on the horizontal machining center

기상계측 시스템을 이용하여 공작기계 공간상의 오차를 측정하기 위해서는 측정값의 기준이 되는 측정구(artifact)가 필요한데 본 논문에서는 Fig.3에 나타낸 바와 같이 고정도의 구를 이용한 구 측정구(spherical ball artifact : SBA)를 고안하여 이용했다. 고안된 구 측정구는 진구도가  $0.4\mu\text{m}$ 이하인 4개의 구를 공작기계의 작업영역을 고려하여 X, Y, Z축 방향에서 일정한 간격으로 설치하여 공간상의 오차를 측정할 수 있게 제작된 일종의 마스터 측정장치이다. 구는 열에 의한 영향을 최소화하기 위해서 슈퍼인바(super invar : Ni 31%-Co5%,  $\alpha=1.2e-6$ )를 사용하여 고정했고, 3차원 측정기를 사용하여 기준구(#1)를 중심으로 각 구사이의 거

리를 측정하여 기상계측 시스템의 기준값으로 이용했다. 고안된 구 측정구는 1) 진구도가 우수한 구를 사용하기 때문에 장치의 설치로 인한 설치오차가 무시될 정도로 작고, 2) 동일한 팔렛에 가공물과 반대방향으로 설치하여 절삭작업으로 인한 측정상의 간섭을 줄일 수 있으며, 3) 기계 위에서 가공과 정적오차(기하오차, 열변형 오차)의 측정이 가능하기 때문에 기상계측 시스템을 구현할 수 있다.

기상계측 시스템에 사용된 측정장치는 촉침자(stylus)를 사용한 접촉식프로브와 레이저를 사용한 비접촉식프로브가 이용되는데 측정정도의 측면에서 접촉식프로브가 우수하기 때문에 접촉식프로브를 사용했다. 접촉식프로브는 측정정도가  $1\mu\text{m}(2\sigma)$ 이며, 촉침자를 십자형으로 구성하여 프로브를 구성했고, 기초실험을 통해서 접촉식 프로브가 가지고 있는 오버트레이블(over travel) 오차, 프로브 로빙오차와 측정오차를 보상(calibration)했다. 또, 접촉식프로브는 경사면을 측정할 경우 측정값이 실제 값과 다르기 때문에 경사면의 법선방향을 고려한 중심점의 측정값과 촉침자의 지름을 고려하여 측정해야 하며, 모든 측정면의 법선벡터를 계산해야 하는 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 본 논문에서는 진구도가  $0.4\mu\text{m}$ 이하인 고정도의 기준구(직경:1 inch)의 중심좌표를 측정하는 방법을 이용했다[5.8-9].

접촉식프로브를 사용한 측정원리는 Fig.4에 보여주는 바와 같이 촉침자가 가공물의 표면에 접촉되는 순간에 프로브에서 발생하는 적외선트리거 신호는 OMM(optical module machine)에서 검출되고, OMM과 공작기계의 제어기가 인터페이스 유니트(MI7)에 의해서 연계되어 있어 접촉점의 위치좌표를 검출할 수 있다. 중심좌표는 측정오차를 최소화하기 위해서 최소자승법(least-square fitting)을 이용했고, 구 측정구에 셋업되어 있는 구 표면의 6점의 측정값(좌표값)으로부터 X, Y, Z방향의 중심좌표를 측정했다.

측정은 십자형 촉침자의  $p_0, p_1, p_2$ 를 이용함으로써 구 측정구에 사용된 하나의 구에 대해서 3개의 중심좌표가 측정되고, 동일한 방법으로 구 측정구를 측정함으로써 각 축에 대해서 3점/구 x 4구=12점의 중심좌표값이 측정된다. 따라서, 측정된 중심좌표값과 구 측정구의 CMM측정값으로부터 공작기계가 가지고 있는 기하오차를 측정하고,

열변형 오차모델을 이용하여 공작기계의 열변형 오차를 해석함으로써 공간상의 정적오차 해석이 가능하다.

본 측정시스템의 측정은 기계상에서 이루어지고, 작업 중에 측정장치를 설치할 필요가 없으며, 측정과 동시에 측정결과를 이용하여 오차보정이 가능하기 때문에 측정시간의 단축, 신속한 오차 측정 및 생산성을 높일 수 있는 특징이 있다.

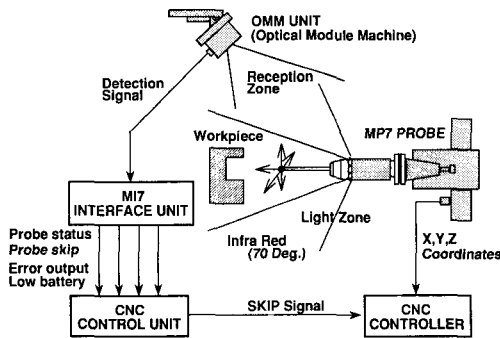


Fig. 4 Measurement principle of touch probe unit

#### 4. 측정실험 및 결과

열변형 오차 측정은 수평형 머시닝센터의 치구에 설치된 구 측정구의 중심좌표를 십자형 프로브를 이용하여 측정하고, 측정값은 측정과 동시에 RS232C를 통해서 해석용 PC로 업로드(upload)된다. PC에서는 최소자승법을 이용하여 구 측정구의 중심좌표를 계산하고, 계산된 중심좌표의 측정결과와 열변형 오차 모델식을 이용하여 공간상의 열변형 오차를 측정했다. 실험장치의 구성은 다음 Table 1과 같다.

열변형 오차 측정실험은 열원에 의해서 발생하는 공작기계의 열변형 오차를 측정하기 위해서 스피들 유니트를 1000rpm, 2000rpm, 2500rpm, 3000rpm 및 랜덤한 실험조건으로 회전시켜 열원을 발생시켰다. 이러한 조건하에서 온도변화 특성을 측정했고, 매 20분 간격으로 구 측정구의 중심좌표를 십자형 프로브로 측정하여 각 점에서의 스피들 유니트의 열변형 오차, 칼럼의 각변위 오차를 측정했고, 측정결과를 이용하여 공작기계 공간상의 열변형 오차를 측정/해석했다.

Table 1 Specifications of the inspection system

System Components	Specifications
Machine Tools	Horizontal Machining Center
Laser Interferometer	HP5528A
Temperature Logger	TempScan/1000 32 input channels 8Mbyte memory Pre-trigger / Post-trigger RS-232C / IEEE488
Touch Probe	MP7 (Ranishaw) Optical type MI7 Interface unit Star type Stylus (L=50mm)
CMM	Leitz PMM (Brown & Sharpe) U1(μm) = 0.5 + L/700 U3(μm) = 0.8 + L/700
Spherical Ball Artifact	Sphericity : 0.1μm ~ 0.4μm Diameter : 25.3998mm ~ 25.4mm Super Invar : α = 1.2e-6

Fig.5는 2500rpm으로 회전시켰을 때의 온도변화 특성을 나타낸 것이고, Fig.5에서 #1~#3은 스피들 유니트의 상면에서 측정한 온도이고, #4와 #5는 스피들 유니트가 설치된 칼럼의 플랜지면에서 측정한 온도이다. #6와 #7은 칼럼에서 측정된 온도이다.

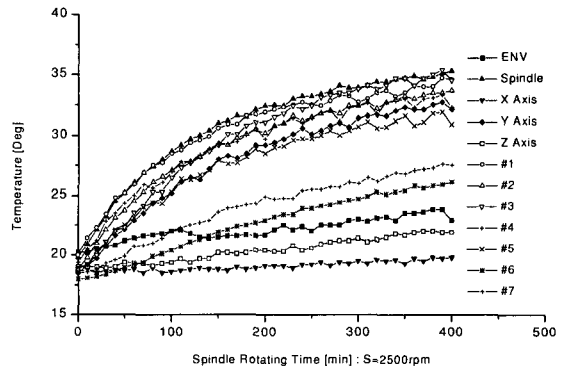
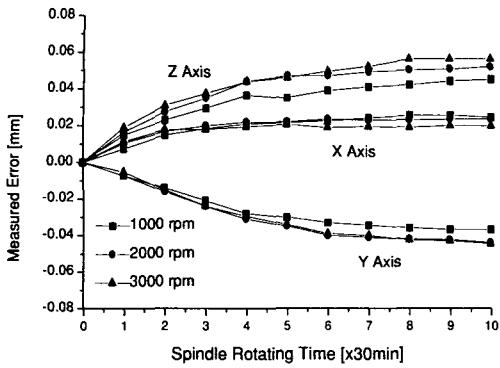
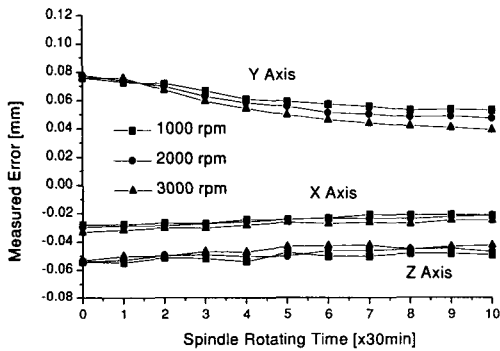


Fig. 5 Trend of temperatures in horizontal machining center (S=2500rpm)

Fig.6은 스피들 유니트를 각각 1000rpm, 2000rpm, 3000rpm으로 회전시켜 기준구(#1)와 상대구(#4)를 접촉식프로브로 측정했을 때 기준 측정자  $p_0$ 의 측정값의 변화와 기준구와 상대구 사이의 측정값의 변화량을 나타낸 것이다.



(a) Measured scalar error trends by the 1<sup>st</sup> stylus in the reference ball

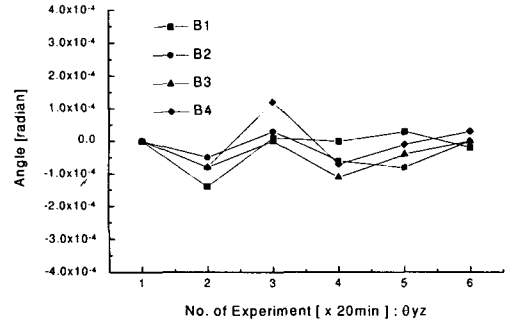


(b) Measured volumetric error trends between the 1<sup>st</sup> and the 4<sup>th</sup> balls

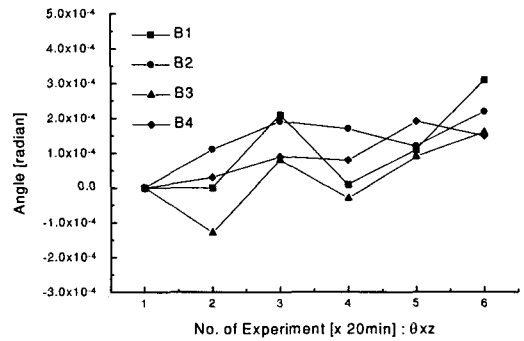
Fig. 6 Measured scalar and volumetric errors with respect to spindle rotational speed in X, Y, and Z axes

Fig.6에서 나타낸 바와 같이 기준구를 측정했을 때의 측정값의 변화경향은 X축과 Z축의 경우는 시간에 따라(온도증가에 따라) 증가하며, Y축의 경우는 감소하는 형태로 나타났다. 따라서, 이러한 실험결과로부터 열원이 발생할 때 스핀들 유니트에 부착된 공구 끝점은 XY, YZ평면상에서 -X, +Y, -Z방향으로 변화함을 알 수 있다. 또한, 회전수가 증가함에 따라 측정값은 Y, Z방향에서 비교적 크게 변하고 있는데 이는 발생열원에 의한 영향으로 스핀들 유니트가 직접적인 영향을 받기 때문이라고 판단된다. 특히, Y축 방향의 측정값이 크게 변화하고 있는데 이러한 결과는 수평형 머시닝센터의 구조상 스핀들 유니트가 Y축의 볼 스크류에 의해서 지지되고 있어 발생열원이 Y축의 볼

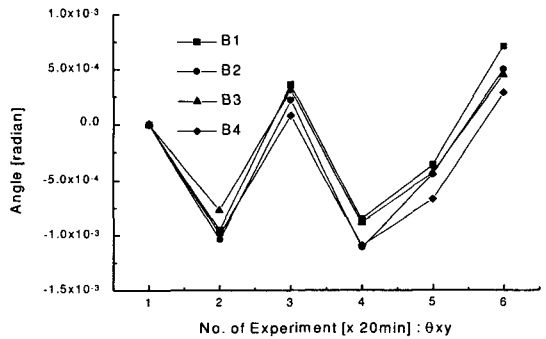
스크류에 직접적인 영향을 미치기 때문에 판단된다.



(a) Rotational angles with respect to X axis on each ball:  $\theta_{yz}$



(b) Rotational angles with respect to Y axis on each ball:  $\theta_{xz}$

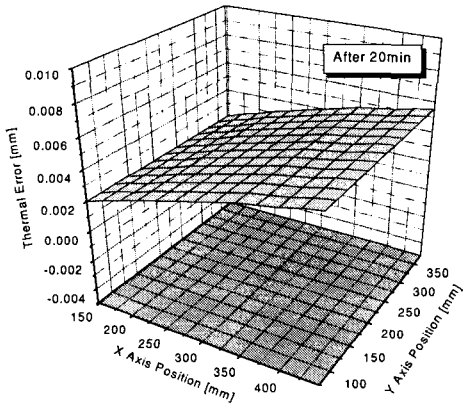


(c) Rotational angles with respect to Z axis on each ball:  $\theta_{xy}$

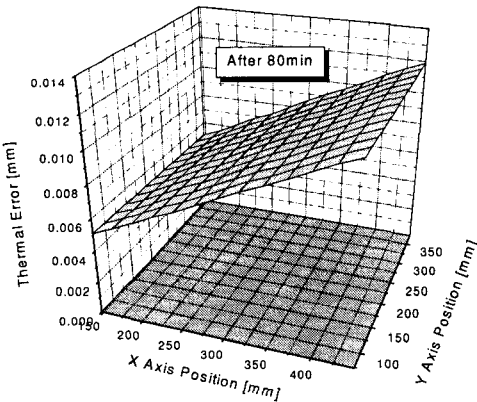
Fig. 7 Measured rotational angles of the column with respect to the spindle rotating time

다음 Fig.7은 랜덤한 실험조건으로 스핀들 유니트를 회전시키면서 매 20분 간격으로 십자형 프

로브를 이용하여 구 측정구를 측정한 각변위 오차의 변화특성을 나타낸 것이다. 온도변화에 따라 유사한 변화특성이 나타났고, XZ, YZ평면에서는 비교적 미소했으나 XY평면에서의 각변위  $\theta_{xy}$ 는 큰 변화를 보였다. 이러한 현상은 스핀들유니트의 정위치를 설정하는 CNC제어기의 정위치제어(orientation control)기능에 의한 영향으로 판단된다.



(a) 20min



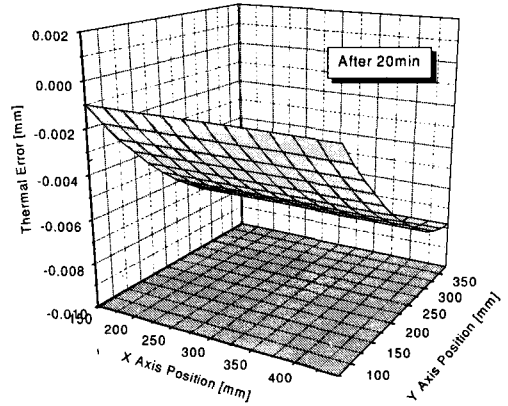
(b) 80min

Fig. 8 Measured volumetric thermal errors in X axis under Random condition #1

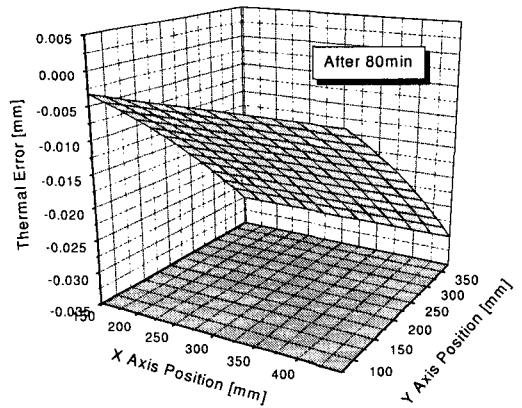
스핀들회전에 의한 열변형을 배제한 상태에서 측정된 스핀들 유니트의 정위치 각변위 정도는 0.0003rad이하로 매우 미소했다. Fig.8, Fig.9, Fig.10은 칼럼의 각변위 오차, 스핀들 유니트 및 이송축의 열변형 오차의 측정결과와 오차모델을 이용하여 해석된 수평형 머시닝센터의 공간상의 열변형 오차를 나타낸 것이다.

## 5. 결론

본 논문에서는 공작기계의 열변형 오차를 기상계측 방법으로 측정하는데 있어 핵심적인 구 측정구를 고안하여 기상계측 시스템을 개발했다. 또, 개발된 기상계측 시스템과 열변형 오차모델을 이



(a) 20min



(b) 80min

Fig. 9 Measured volumetric thermal errors in Y axis under Random condition #1

용하여 온도변화에 따른 공작기계 이송축의 오차, 칼럼의 오차 및 스핀들 유니트의 오차를 측정하여 공간상의 열변형 오차를 측정/해석했다. 본 논문에서 고안된 구 측정구는 선풍창계수가 아주 작은 슈퍼인바( $\alpha=1.2e-6$ )를 사용함으로써 주위 온도변화에 의한 영향을 최소화하도록 설계했다. 본 논문에서 얻은 결론은 다음과 같다.



- 1) 접촉식프로브와 구 측정구를 고안하여 공작기계 상에 신속하고, 고정도로 공작기계의 열변형 오차를 측정할 수 있는 기상계측 시스템을 개발했고, 개발된 시스템을 이용함으로써 측정 시간을 크게 단축했다.
- 2) 공작기계의 운동특성을 고려하여 열변형 오차를 모델링했고, 공작기계의 작업공간을 고려하여 고안된 구 측정구를 이용하여 오차모델에 포함된 스핀들 유니트, 칼럼 및 이송축의 오차를 측정함으로써 공간상의 열변형 오차를 손쉽게 측정/해석이 가능했다.
- 3) 스핀들을 회전시켜 발생한 열원에 의해서 스핀들에 설치된 공구 끝점은 -X, +Y, -Z 방향으로 변화했다.
- 4) 구 측정구의 기준구(#1)와 상대구(#4)에 의해서 측정된 열변형 오차는 온도가 증가함에 따라 Y, Z방향의 오차가 크게 나타났는데 이는 발생 열원이 스핀들 유니트와 Y축에 직접적인 영향을 미치기 때문이다. 특히, Y축 방향의 측정

값이 크게 변하고 있는데 이는 머시닝센터의 구조적인 문제라고 판단된다.

- 5) 구성된 기상계측 시스템을 이용하여 구 측정구의 기준구(#1)의 중심좌표를 반복측정 했을 때 표준 편차(standard deviation:  $\sigma$ )는 X, Y, Z축 방향에서 평균값에 대해 각각  $2\mu\text{m}$ 이하의 비교적 높은 측정정도를 얻었다.
- 6) 기상계측 방법으로 신속한 오차 측정이 가능하기 때문에 공작기계 오차의 상태변화감시에 응용할 수 있다.

### 참고문헌

1. J.S. Chen, et al, "Thermal Error Modeling for Volumetric Error Compensation," Sensors and Signal Processing for Manufacturing, PED-Vol.55, ASME, 1992.
2. J. Mou, "Using Neural Network and Kinematics for Machine Tools Error Estimation and Correction," Transactions of MANRI/SME, Vol.22, 1994.
3. S.Yang, et al, "Accuracy Enhancement of a Horizontal Machining Center by Real-Time Error Compensation," J. of Manufacturing Systems, Vol.15, No.2, 1996.
4. S.D.Murphy, In-Process Measurement and Control, New York & Base, 1990.
5. M.Yang, J. Lee, "Measurement and Prediction of thermal Error of a CNC Machining Center using Two Spherical Balls," J. of Materials Processing Technology, Vol.75, No.1-3, 1998.
6. Bryan, J.B., "International Status of Thermal Error Research (1990)," Annals of the CIRP, Vol.39, No.1, 1990.
7. A.K.Srivastava, et al, "Modeling Geometric and Thermal Errors in a Five-axis CNC Machine Tools," Int. J. of Mach. Tools Manufact., Vol.35, No.9, 1995.
8. 이재중, 양민양, "이동열원을 고려한 CNC 공작기계의 열오차해석 및 보정," 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp.283~287, 1997.
9. Y. Hatamura, et al, "Development of an Intelligent Machining Center Incorporating Active Compensation for Thermal Distortion," Annals of the CIRP, Vol.42, No.1, 1993.
10. 이재중, 양민양, "기상계측시스템을 이용한 머시닝센터의 기하오차 모델링 및 오차측정," 한국정밀공학회지, 제 16 권, 제 2 호, pp.201~210, 1999.

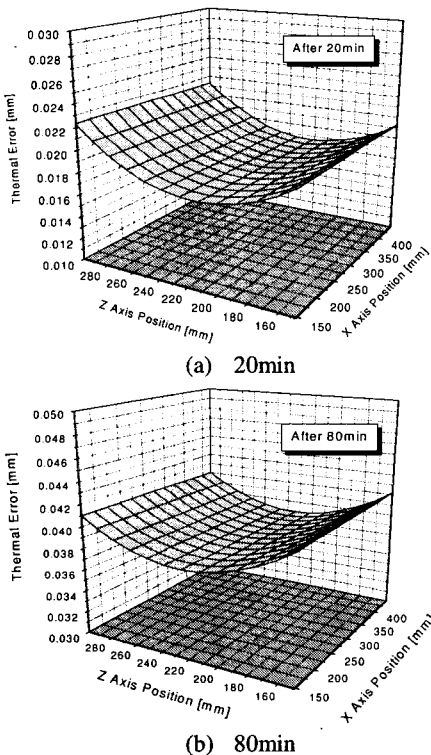


Fig. 10 Measured volumetric thermal errors in Z axis under Random condition #1