

## 반구상의 볼바측정을 통한 스피들 열변형 오차 측정

양 승 한\* · 김 기 훈\*

(2000년 12월 16일 접수, 2001년 6월 7일 심사완료)

### Measurement of Spindle Thermal Errors in a Machine Tool Using Hemispherical Ball Bar Test

Seung-Han Yang and Ki-Hoon Kim

**Key Words:** Thermal Errors of the Spindle(스피들 열변형 오차), Ball Bar System(볼바 시스템)

#### Abstract

Improvement of machine tool accuracy is an essential part of quality control in manufacturing process. Among of all the errors of a particular machine tool, the thermal errors of the spindle have a notably significant effect on machining accuracy and have a direct influence upon both the surface finish and geometric shape of the finished workpiece. Therefore, this paper proposed new measurement method for thermal errors of the spindle in machine tools. The thermal errors are measured by a ball bar system instead of capacitance sensor system. The novel measurement method using ball bar system is more efficient, easier to use than conventional measurement system. And also the ball bar system is possible to measure both geometric errors and thermal errors at the same time.

#### 1. 서 론

최근에는 생산성 향상을 위해서 주축의 회전속도와 이송축동 공작기계 가동부의 고속화가 필수적인 조건이다. 고속화는 공작기계 자체의 열적인 영향력을 더욱 증대시키고, 모터, 베어링, 유압 시스템, 주위 온도로 인한 기계요소들의 열적 뒤틀림으로 이어진다. 이것은 최종적으로 공구 끝과 공작물의 불일치로 인한 공작물 오차로 연결되므로 주축의 열변형 오차를 정확히 측정하고 보정하는 일이 다방면으로 연구되어 왔다.<sup>(1-18)</sup> 일반적으로 공작기계의 기하학적 오차는 레이저 시스템 혹은 볼바를 사용하여 측정하고 열변형 오차는 정전용량센서를 사용하거나 접촉식 탐침기(Touch Probe)등을 사용하여 측정했다. 이와같

이 공작기계의 기하학적 오차와 열변형 오차를 측정할 때 각각 다른 시스템을 사용하는 것은 측정의 번거로움뿐만 아니라 사용에 있어서도 많은 어려움이 있다. 또 장비를 유지, 보수하는데도 상당한 비용이 든다.

이러한 어려움 때문에 1994년 Srinivasa은 볼바 시스템을 이용하여 열변형 오차를 측정하였다. 그러나 이 실험은 단지 2축 공작기계에만 한정되었고 주축 열변형을 4개의 볼바시스템을 조합하여야만 가능하였다.<sup>(19,20)</sup> 그 후 몇몇 연구에서 볼바를 사용하여 공작기계의 열변형 오차에 대한 측정을 시도하였지만 뚜렷한 진척을 보지 못하였고, 이 연구가 3축 공작기계까지 이어지지는 않았다. 또 4개의 볼바시스템의 기하학적 조합이 아니라 단 하나의 볼바시스템으로 열변형 오차를 측정하는 것은 전무하였다.

따라서 본 논문에서는 단 하나의 볼바시스템만으로 3축 공작기계의 열변형 오차를 측정하고 해석해내는 새로운 방법을 제시하였다. 이를 위해서 수직형 공작기계의 체적오차합성모델을 유도

\* 책임저자, 회원, 경북대학교 기계공학부  
E-mail : syang@knu.ac.kr  
TEL : (053)950-6569 FAX : (053)950-6550  
\* 경북대학교 대학원 기계공학부

하였고 이를 3차원 반구상의 나선형 이동경로를 가지는 반구상의 나선형 볼바측정(ball bar test of hemispherical helix)에 적용하였다. 이것으로 얻어진 주축의 열변형 오차를 정진용량센서로 측정하고 비교한 결과 6 μm이내까지 정확하게 일치하였다. 이로써 단 하나의 볼바시스템만으로 3축 공작기계의 열변형 오차를 측정하는 새로운 장을 열었다.

2. 공작기계오차와 체적오차합성모델

2.1 공작기계오차

3축 공작기계는 21개의 기하학적 오차와 11개의 열변형 오차로 구성된다.<sup>(1~18)</sup> 기하학적 오차는 각 축에 대하여 3개의 병진오차와 3개의 회전오차, 그리고 두 축사이의 직각도오차이다. 열변형 오차는 공구 끝에서의 5개의 오차(3개의 드리프트 오차, 2개의 틸트오차)에 각 축사이의 상대적인 원점이동 오차 6개가 추가된다. 이러한 공작기계 오차는 어떠한 인자에 영향을 받는가를 고려하여 위치 종속적인 오차요소와 온도 종속적인 오차요소, 그리고 위치와 온도 종속적인 오차요소의 3가지 형태로 나눌 수 있다.

위치 종속적인 오차요소는 각 축에서의 2개의 진직도오차와 3개의 회전오차, 그리고 직각도오차가 있다. 직각도오차는 엄밀히 말하면 상수항으로 위치와는 무관하지만 항상 X, Y, Z축으로의 이동과 관계됨으로 위치 종속적인 항으로 묶었다. 온도 종속적인 오차요소는 원점 이동오차와 스핀들 이동오차가 있다. 이들 각각의 오차는 기계의 온도에 대해서 영향을 받는 값이고 위치와는 무관하게 된다. 마지막으로 위치·온도 종속적인 오차요소는 각 축에서 발생하는 선형변위오차로 이 오차의 윤곽은 다른 온도 영역하에서 그다지 크게 변하지 않고 곡선의 기울기만 변한다.

공작기계에서의 실제오차는 위에서 언급한 위치와 온도에 의존하여 복합적으로 나타나며 이것을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$E(p, T) = E_g(p) + E_f(T) + E_g(p, T) \tag{1}$$

여기서,

$E(p, T)$  : 공작기계 체적오차

$E_g(p)$  : 공작기계 기하학적 오차요소 중

위치 종속적인 오차요소

$E_f(T)$  : 공작기계 열변형 오차요소 중 온도 종속적인 오차요소

$E_g(p, T)$  : 공작기계 기하학적 오차요소 중 위치·온도 종속적인 오차요소

2.2 체적오차 합성모델

수직형 공작기계의 모든 오차요소를 합성한 체적오차 합성모델(Volumetric Error Synthesis Model)을 등변환 행렬로 유도하였다. Fig. 1에서 보여주는 것처럼 좌표계를 움직이는 각 슬라이드에 지정한다. 베드위의 좌표계 A를 기준 좌표계로 간주한다. 좌표계 B는 Y축 슬라이더에, 좌표계 C는 X축 슬라이더에, 그리고 좌표계 D는 Z축 스핀들 캐리어에 고정하였다. 그리고 Fig. 2와 같이 공구의 끝에는 공구 좌표계(TCS)를 공작물의 가공점에는 공작물 좌표계(PCS)를 설치한다.

체적오차 합성모델의 유도는 공구 좌표계와 공작물 좌표계를 일치시킴으로서 유도할 수 있다. 먼저 공구 좌표계를 기준 좌표계 A로 변환한다. 그 다음 공작물 좌표계를 동일한 기준 좌표계 A로 역시 변환한다. 절삭될 공작물의 가공점과 공구 끝은 같은 위치에 있기 때문에 균일변환행렬에 의해서 식 (2)~(4)가 성립된다.

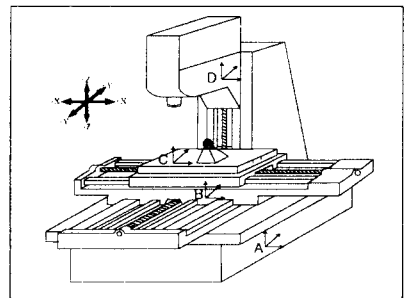


Fig. 1 Machine coordinate system

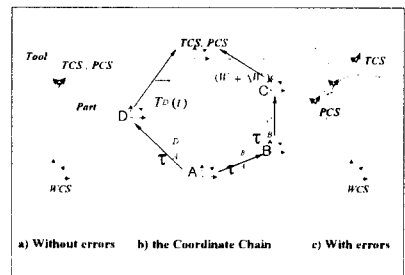


Fig. 2 The Coordinate Chain with errors

$$\vec{T}_A(t) = \tau_A^D \vec{T}_D(t) \quad (2)$$

$$(\vec{W} + \Delta\vec{W})_A = \tau_A^B \tau_B^C (\vec{W} + \Delta\vec{W})_C \quad (3)$$

$$\tau_A^D \vec{T}_D(t) = \tau_A^B \tau_B^C (\vec{W} + \Delta\vec{W})_C \quad (4)$$

여기서,

$\vec{T}_A(t)$  : 좌표계 A에서 공구 끝의 벡터

$\vec{T}_D(t)$  : 좌표계 D에서 공구 끝의 벡터

$\tau_A^D$  : 슬라이드 좌표계 D에서 슬라이드 좌표계 A로의 변환행렬

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

$\tau_A^B$  : 슬라이드 좌표계 B에서 슬라이드 좌표계 A로의 변환행렬

$\tau_B^C$  : 슬라이드 좌표계 C에서 슬라이드 좌표계 B로의 변환행렬

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

결과적으로 공작물 오차벡터  $\Delta\vec{W}_C$  는 식 (4)를 이용해서 풀 수 있다. 2차 이상의 고차항들을 무시하면 공작물의 체적오차는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta x = \Delta x_t + \Delta x_r = \Delta S_x - \Delta yx_x + \Delta yz_x - \delta_{xx} - \delta_{xy} + \delta_{xz} - \epsilon_{xx} L \\ + \epsilon_{zx} T_y + \epsilon_{yz} (T_z - L) + \epsilon_{zx} (Oyz_y - Oyx_y + T_y - y) \\ + \epsilon_{zy} (Oyz_y + T_y - y) + \epsilon_{yx} (Oyx_z - Oyz_z - T_z + L - z) \\ + \epsilon_{yz} (L - Oyz_z - T_z - z) - S_{zx} z \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta y = \Delta y_t + \Delta y_r = \Delta S_y - \Delta yx_y + \Delta yz_y - \delta_{yx} - \delta_{yy} + \delta_{yz} + \epsilon_{xx} L \\ + \epsilon_{yz} (-Oyz_x - T_x) + \epsilon_{zz} T_x + \epsilon_{zx} (Oyx_x - Oyz_x - T_x + x) \\ + \epsilon_{yy} (Oyz_z + T_z - L + z) + \epsilon_{yx} (Oyz_z - Oyx_z + T_z - L + z) \\ + \epsilon_{xz} (L - T_z) + S_{yy} x - S_{yz} z \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta z = \Delta z_t + \Delta z_r = \Delta S_z - \Delta yx_z + \Delta yz_z - \delta_{zx} - \delta_{zy} + \delta_{zz} - \epsilon_{yz} T_x \\ + \epsilon_{yx} (Oyz_x + T_x) + \epsilon_{zz} T_y + \epsilon_{zx} (Oyz_x - Oyx_x + T_x - x) \\ + \epsilon_{xy} (-Oyz_y - T_y + y) + \epsilon_{xx} (Oyx_y - Oyz_y - T_y + y) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$  : X축 슬라이드 시스템 C에서 공작물 좌표

$T_x, T_y, T_z$  : 스펀들 캐리어 좌표계 D에서 표준 공구끝의 좌표

$L$  : 공구 교환시 공구 오프셋 길이

$x, y, z$  : X, Y, Z축 좌표계에서 각 슬라이더의 이동거리

$\Delta x_g, \Delta y_g, \Delta z_g$  : 각 방향 공작기계 기하학적오차

$\delta_{xx}, \delta_{yy}, \delta_{zz}$  : X, Y, Z축 방향의 선형변위오차

$\delta_{yx}, \delta_{zx}, \delta_{xy}, \delta_{zy}, \delta_{xz}, \delta_{yz}$  : 진직도오차

$Oyx_x, Oyx_y, Oyx_z$  : Y축 원점  $O_y$ 에 대한 X축 원점  $O_x$ 의 세 방향거리

$\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{zz}$  : X, Y, Z축 방향의 롤

$\epsilon_{yx}, \epsilon_{zx}, \epsilon_{xy}, \epsilon_{zy}, \epsilon_{xz}, \epsilon_{yz}$  : 각도오차

$S_{xy}, S_{yz}, S_{zx}$  : 두 축사이의 직각도오차

$\Delta x_t, \Delta y_t, \Delta z_t$  : 각 방향 공작기계 열변형오차

$\Delta S_x, \Delta S_y, \Delta S_z$  : 표준 공구 팁에서 X, Y, Z축 방향으로 스펀들 드리프트

$\epsilon_{xs}, \epsilon_{ys}$  : X, Y축 방향의 스펀들 틸트

$\Delta yx_x, \Delta yx_y, \Delta yx_z$  :  $O_y$ 에 대한 원점  $O_x$ 의 세 방향으로의 원점 열변형

$\Delta yz_x, \Delta yz_y, \Delta yz_z$  :  $O_y$ 에 대한 원점  $O_z$ 의 세 방향으로의 원점 열변형

### 3. 열변형 오차의 해석

#### 3.1 열변형 오차해석을 위한 불바식 유도

열변형 오차의 영향은 앞서도 살펴보았듯이 주축의 3개의 드리프트오차와 2개의 틸트오차의 주 원인이되며 선형변위오차에도 영향을 미친다. 이 중에서도 스펀들에서 발생하는 열변형은 상당히 큰 값이고, 선형변위오차는 상대적으로 미소한 값이다. 따라서 스펀들의 열변형 오차가 전체 열변형 오차의 대부분을 차지한다.

열변형 측정을 하기 전에 열변형 오차를 야기 하는 열원에 대해 알아보기 위해 주축과 베드가 분리된 공작기계의 열적 거동에 대한 연구를 조사<sup>(15,16)</sup>하였다. 그 결과 다음과 같은 일반적인 결론을 얻을 수 있었다.

(1)주축의 이송과 회전으로 인한 온도변화는 다른 축의 열변형에 영향을 크게 주지 않는다.

(2)베드를 구성하고 있는 축의 이송으로 인한 온도변화 또한 주축의 열변형에 영향을 크게 주지 않는다.

(3)열변형 오차의 영향은 기하학적 오차 가운데 각도오차와 진직도 오차에는 영향을 미치지 않고, 다만 선형변위오차의 기울기의 변화에는 영향을 미친다.

이상의 결론을 정리하면 스핀들 끝의 열변형 오차(3개의 드리프트오차와 2개의 틸트오차)와 주축의 선형변위오차는 주축의 이송과 회전에만 관계되고 베드의 이송에는 영향을 받지 않는다. 반대로 베드의 이송에 의한 열발생은 베드를 구성하고 있는 축의 선형변위오차의 기울기의 변화에만 영향을 미친다. 또, 선형변위오차를 제외한 기하학적 오차는 열에 의한 변화가 생기지 않는다. 물론 미소하나마 서로의 열원에 의해 영향을 주고받지만 이를 무시한다. 이러한 일반적인 결론을 바탕으로 볼바를 이용한 주축의 열변형 측정을 시도하였다. 주축의 열변형은 공구 끝에 그 영향이 그대로 전달되므로, 이 오차는 열변형 전·후의 볼바측정의 차이로 드러난다. 이 오차를 해석하기 위해 3차원상의 볼바가 가지는 위치를 고려하여 Fig. 3과 같이 각 점의 기하학적 오차와 열변형 오차가 포함된 볼바식을 유도하였다. 볼바측정을 위한 이상적인 원점은  $(x_0, y_0, z_0)$ 이지만 기하학적 오차와 베드에 발생하는 열변형 오차를 포함하여 실제원점의 좌표는  $(x_0', y_0', z_0')$ 이 된다. 또, 반지름이  $R$ 인 볼바시스템이 가지는 위치는  $(x, y, z)$ 이지만, 기하학적 오차와 주축의 열변형 오차가 포함되어 실제로는  $(x'', y'', z'')$ 이 된다. 그러나 주축의 열변형만 측정하고자 한다면 베드의 이송은 하지 않아도 된다. 베드의 이송을 하지 않아 베드에서의 열발생이 없다면 원점에서의 열변형 오차는 없다. 따라서 측정원점은 기하학적 오차만 포함된  $(x_0', y_0', z_0')$ 이 되고  $R'$ 이 볼바측정시 얻는 반지름이다. 따라서 식 (6)과 같은 관계식을 얻는다.

$$\begin{aligned}
 x_0' &= x_0 + \Delta x_{0g} \\
 y_0' &= y_0 + \Delta y_{0g} \\
 z_0' &= z_0 + \Delta z_{0g} \\
 x'' &= x + \Delta x_g + \Delta x_t \\
 y'' &= y + \Delta y_g + \Delta y_t \\
 z'' &= z + \Delta z_g + \Delta z_t
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

여기서,

- $\Delta x_{0g}, \Delta y_{0g}, \Delta z_{0g}$  : 원점에서의 기하학적 오차
- $\Delta x_g, \Delta y_g, \Delta z_g$  : 측정점에서의 기하학적 오차
- $\Delta x_t, \Delta y_t, \Delta z_t$  : 측정점에서의 열변형 오차

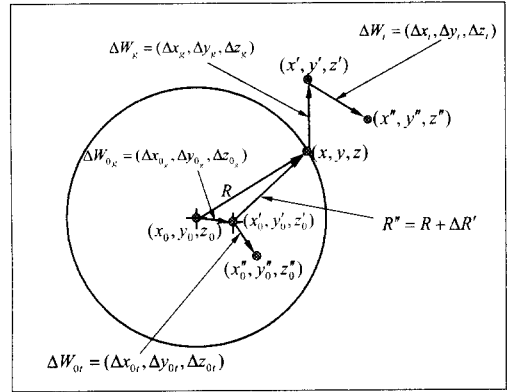


Fig. 3 A Schematic diagram for ball bar test

또 이상적인 반지름  $R$ 과 실제로 측정되는 반지름  $R'$ 를 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 R &= \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} \\
 R' &= \sqrt{(x''-x_0')^2 + (y''-y_0')^2 + (z''-z_0')^2}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

그리고 반지름오차  $\Delta R'$ 은

$$\Delta R' = \sqrt{(x''-x_0')^2 + (y''-y_0')^2 + (z''-z_0')^2} - R
 \tag{8}$$

여기에 식 (6)을 대입하면, 식 (9)과 같다.

$$\begin{aligned}
 R + \Delta R' &= \sqrt{(x-x_0 + \Delta x_g + \Delta x_t - \Delta x_{0g})^2 + (y-y_0 + \Delta y_g + \Delta y_t - \Delta y_{0g})^2 + (z-z_0 + \Delta z_g + \Delta z_t - \Delta z_{0g})^2}
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

식 (9)의 양변을 제곱하여 2차 이상의 미소값을 무시하면 최종적으로 식 (10)과 같다.

$$\begin{aligned}
 R + \Delta R' &= (x-x_0)(\Delta x_g - \Delta x_{0g}) + (x-x_0)\Delta x_t \\
 &\quad + (y-y_0)(\Delta y_g - \Delta y_{0g}) + (y-y_0)\Delta y_t \\
 &\quad + (z-z_0)(\Delta z_g - \Delta z_{0g}) + (z-z_0)\Delta z_t
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

만약 열변형이 없다면 볼바식은 식 (11)과 같다.

$$R\Delta R = (x-x_0)(\Delta x_g - \Delta x_{0g}) + (y-y_0)(\Delta y_g - \Delta y_{0g}) + (z-z_0)(\Delta z_g - \Delta z_{0g}) \quad (11)$$

따라서 식 (10)을 식 (11)의 관계식으로 대치하면 식 (12)로 다시 쓸 수 있다.

$$R(\Delta R' - \Delta R) = (x-x_0)\Delta x_t + (y-y_0)\Delta y_t + (z-z_0)\Delta z_t \quad (12)$$

여기서

$$\Delta x_t = \Delta S_x(t) - L\epsilon_{ys}(t) : X \text{ 방향 열변형 오차}$$

$$\Delta y_t = \Delta S_y(t) + L\epsilon_{xs}(t) : Y \text{ 방향 열변형 오차}$$

$$\Delta z_t = \Delta S_z(t) + \delta_{zz}'(t) : Z \text{ 방향 열변형 오차}$$

$$\delta_{zz}'(t) : Z \text{ 방향 선형변위 오차의 기울기 변화량}$$

최종적으로 식 (12)는 다음의 행렬식으로 표현된다.

$$Y = AX \quad (13)$$

여기서,

$$Y = R(\Delta R' - \Delta R)$$

$$A = [(x-x_0) \quad (y-y_0) \quad (z-z_0) \quad (z-z_0)z]$$

$$X = \begin{bmatrix} \Delta S_x - L\epsilon_{ys} \\ \Delta S_y + L\epsilon_{xs} \\ \Delta S_z \\ \delta_{zz}' \end{bmatrix}$$

여기서, **Y**의 값은 열변형 전·후의 불바측정 값이고, **A**행렬은 반구상의 나선형 불바측정시 얻는 3차원 상의 점이며 **X**는 구하고자 하는 값이다.

### 3.2 실험방법

불바를 사용하여 주축의 열변형 오차를 해석하는 이 실험은 크게 2가지로 진행된다.

(1) 먼저 기계의 열변형 오차의 거동을 파악하기 위해 일정조건으로 기계를 가동시킨 후 정전용량센서를 이용하여 일정한 시간간격으로 열변형 오차를 측정한다.

(2) 불바를 통해 열변형 오차를 해석하기 위해 열변형 전의 냉간조시의 불바측정을 한다. 그런 후 앞선 실험에서와 동일한 조건으로 기계를 가동시킨 후 일정시간마다 불바측정을 한다. 그런 후 불바측정의 차이로 얻어진 값을 해석하여 정

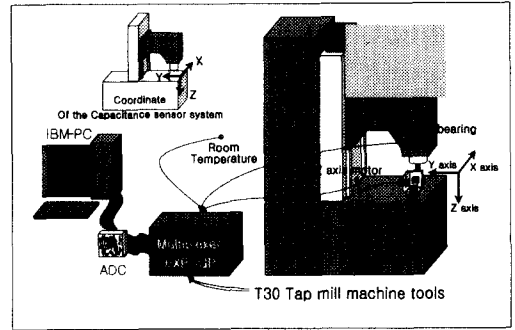


Fig. 4 Set up of capacitance sensor system

전용량센서에서 측정한 값과 비교한다.

열변형 오차를 측정하기 위한 실험장치구성은 Fig. 4와 같다. 열변형 측정값과 온도와의 대략적인 경향을 알아보기 위해 열원의 주위에 온도센서를 부착한다. 공작기계 구조물에 부착된 온도센서는 스피들 베어링부와 Z축 이송모터 하부에 부착되었다. 또, 대기중의 온도 역시 측정하였다. 온도센서를 통해 얻어지는 저항값의 변화는 앰프를 거쳐 증폭된 후, ADC카드를 통해 PC로 보내진다. 또 스피들 드리프트오차를 측정하기 위한 장치로 스피들에 테스트 바를 장착하고 전하 센서를 고정시킨다. 사용된 정전용량센서는 LOW Sensitivity로 측정범위는 127 $\mu$ m - 381 $\mu$ m이며 전압은  $\pm 5V$ 이다. 따라서, 0.1V변동에 2.54 $\mu$ m가 된다.

이 실험장치를 이용하여 여러 단계로 스피들과 주축의 속도를 변화시키면서 실험하였다. 실험 조건은 Fig. 5에 나타나 있다. 기계를 작동하기 전에 온도를 측정하였고, 이때의 정전용량센서의 값을 영점 조정하였다. 그리고 나서 92분 동안 7500 rpm으로 스피들을 회전시키면서 동시에 Z축을 7500 mm/min의 고속으로 움직였다. 기계를 멈추고 40분 가량 냉각을 시킨 다음, 44분 동안 스피들 2500 rpm, Z축을 2500 mm/min의 저속으로 움직였다. 그런 후 냉각 없이 72분 동안 7500 rpm의 스피들 속도로, Z축을 2500 mm/min의 저속으로 움직였다.

이러한 움직임은 온도 변화를 선형 혹은 지수적인 형태가 아닌 복잡한 형태로 발생시키기 위함이고 10분 단위로 각각의 온도 변화와 주축의 열변형 오차를 정전용량센서로부터 읽었다. 이때 원점에서의 열변형(Y, Z축의 선형변위 오차의 기

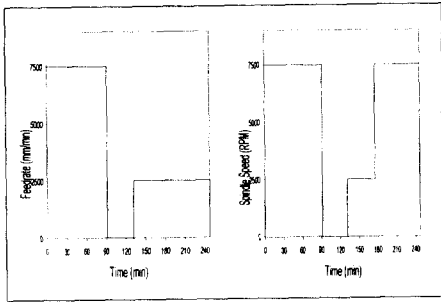


Fig. 5 Experimental condition

을기 변화)을 고려하지 않기 위해서 베드는 움직이지 않았고 반대로 주축의 열변형 오차를 발생시키기 위해서 주축만 회전과 함께 이송을 시켰다.

다음으로 기계를 완전히 냉각시킨 후 볼바 시스템을 장착한 후 Fig. 6, 7와 같이 반구상의 나선형 볼바측정을 하였다. 지금까지의 볼바측정은 단순히 2차원 평면만을 측정하거나 측정원점의 오차를 고려하지 않기 위해서 단지 원점 (X=Y=Z=0)에서만 측정하고 있다. 2차원 평면측정은 한 축의 값을 고정시키고 그 나머지 평면을 측정하는 것이다. 그러나 이러한 측정으로는 모든 오차요소를 얻을 수 없으므로 두 평면 이상을 측정하여야만 모든 오차요소를 얻을 수 있다. 그렇지만 Fig. 6, 7과 같이 반구상의 나선형 이동경로를 따르는 3차원 볼바측정을 한다면 X, Y, Z축의 움직임이 모두 포함되게 된다. 따라서 공작기계의 전 영역의 평가가 가능하므로 한번의 실험장치 구성으로 모든 오차요소를 해석할 수 있는 장점이 있다. 또한 원점을 변화시키지 않기 때문에 측정구성오차를 줄일 수 있는 장점이 있다.

열변형 전의 볼바 측정을 한 후 정전용량센서로 열변형을 측정했을 때와 동일한 조건으로 기계를 작동시켰다. 그런 후 이번에는 20분 간격으로 볼바측정을 하였다. 볼바측정으로 얻어진 값을 식 (13)을 이용하여 스핀들의 열변형 오차로 분석했다. 결과의 일반화를 위해서 같은 조건에서 3회 반복실험한 후 평균을 구하였다.

여기서 사용된 기계는 SPT30 Tap mill machine 이며 주축은 최대 10000 rpm, Feedrate는 10000 mm/min 까지 작동할 수 있다.

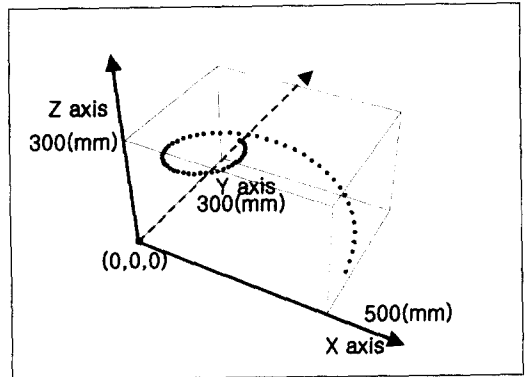


Fig. 6 Trajectory of hemispherical helix

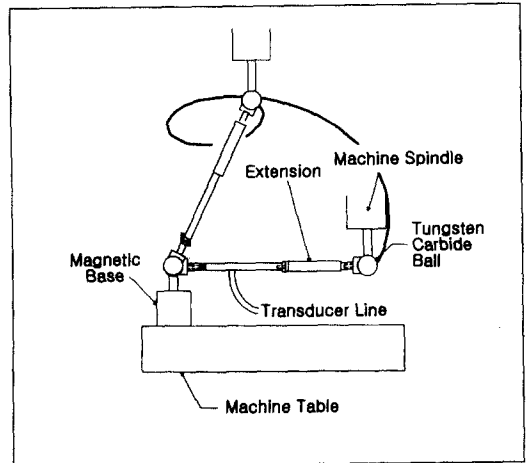


Fig. 7 Set up of ball bar system

### 3.3 실험결과와 고찰

정전용량센서를 통해서 얻은 스핀들 드리프트 오차와 온도와의 관계를 살펴보았다. X축 드리프트오차는 10 μm 이하로 작은 값이 측정되었으며, Y축 드리프트오차는 기계전면으로 발생하였다. 또, Z축 드리프트오차는 스핀들 속도와 밀접하게 관계를 가지며, 스핀들 베어링의 온도기동과 흡사하게 변화하였다. Fig. 8, 9는 각각 작동조건의 변화로 인한 온도변화와 주축의 드리프트오차를 나타낸다.

이러한 스핀들 드리프트오차의 변화를 볼바측정을 통해서도 역시 구했다. 엄밀히 말하면 식 (11), (12)에서 나타냈듯이 공구오프셋이 0일 때 볼바측정을 통해서 얻어지는 값은 드리프트 오차와 같

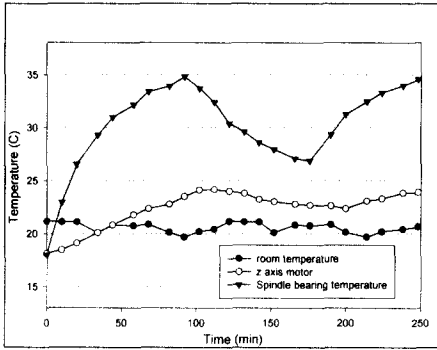


Fig. 8 Temperature variation

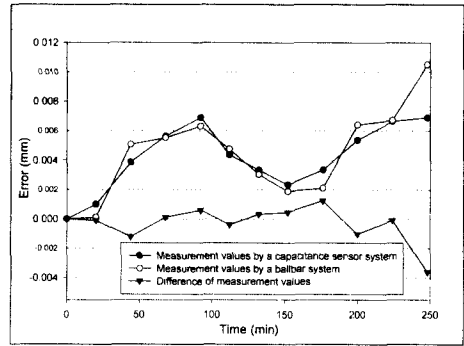


Fig. 10 Spindle drift error in X axis

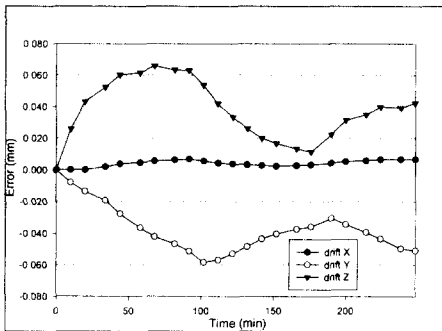


Fig. 9 Spindle drift errors

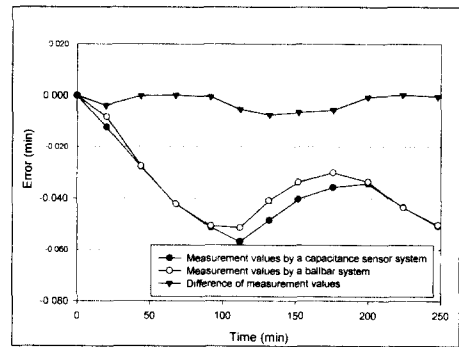


Fig. 11 Spindle drift error in Y axis

Table 1 Difference of measurement values

| Time (min) | drift errors |             |             |
|------------|--------------|-------------|-------------|
|            | drift X(mm)  | drift Y(mm) | drift Z(mm) |
| 0          | 0.0000       | 0.0000      | 0.0000      |
| 20         | -0.0001      | 0.0040      | -0.0127     |
| 44         | -0.0012      | -0.0002     | 0.0025      |
| 68         | 0.0001       | 0.0000      | 0.0012      |
| 92         | 0.0006       | -0.0006     | -0.0073     |
| 112        | -0.0004      | -0.0055     | 0.0026      |
| 132        | 0.0003       | -0.0076     | 0.0000      |
| 152        | 0.0005       | -0.0066     | -0.0059     |
| 176        | 0.0012       | -0.0058     | -0.0095     |
| 200        | -0.0010      | -0.0007     | -0.0099     |
| 224        | -0.0000      | 0.0015      | -0.0123     |
| 248        | -0.0036      | -0.0005     | -0.0156     |
| Mean (Abs) | 0.0008       | 0.0026      | 0.0066      |

다. 그러나 공구오프셋이 있다면 드리프트오차와 틸트오차가 포함된 값이 측정된다. 따라서 이 드리프트오차와 틸트오차 모두를 구하려면 L을 달리하여 한번 더 측정할 수 있다. 이 실험에서는

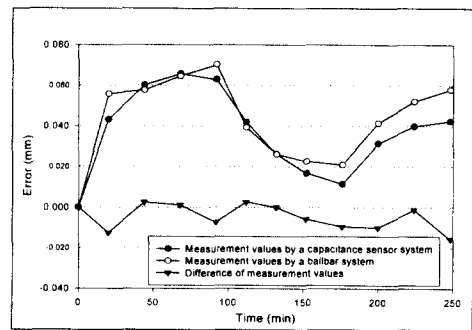


Fig. 12 Spindle drift error in Z axis

L=0 일때의 실험이므로 볼바측정 값이 곧 드리프트오차이다.

Fig. 10~12는 3회 반복실험한 열변형 전·후의 볼바측정 값으로부터 분석한 각 축의 드리프트오차의 평균과 전정용량센서로부터 측정된 값을 비교했다 또, Table 1은 두 측정간의 오차를 나타낸다.

이 결과 볼바를 통해서 해석한 오차와 전하 센서로 측정한 스핀들의 드리프트오차가 거의 일치

하는 것을 알았다. 경향뿐 아니라 그 값까지도 6  $\mu\text{m}$  이내까지 일치함으로 만족스러운 값을 나타낸다. 이것으로 열변형 전과 열변형 후의 볼바측정의 차이를 이용하여 주축의 드리프트 오차를 대단히 정확하게 구했다. 또 틸트 오차 또한 L을 변화시킨다면 구해낼 수 있다. 따라서 간단한 볼바측정만으로도 주축의 열변형 오차를 측정할 수 있다.

#### 4. 결 론

볼바를 이용하여 공작기계의 열변형 오차를 해석하고자 한 본 연구를 통해서 지금까지의 내용을 종합하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 3축 수직형 공작기계의 체적오차합성모델을 등변환행렬을 이용하여 유도하였다.

(2) 열변형 전·후의 볼바측정의 차이를 이용하여 공작기계의 열변형 측정을 가능하게 하는 새로운 볼바 식을 유도했다.

(3) 단 하나의 볼바를 이용하여 주축의 열변형을 측정된 결과를 정전용량센서로 측정된 결과와 비교해 본 결과 X,Y,Z 축 드리프트오차 모두 6  $\mu\text{m}$  이내로 정확히 일치하였다.

(4) 지금까지의 공작기계의 기하학적 오차와 열변형 오차를 각각의 측정시스템으로 측정하는 것을 볼바를 이용하여서 한꺼번에 측정하는 통합측정이 가능하다. 이에 따라 공작기계 오차측정이 절대적으로 편리해졌고 측정장비 구입에 드는 비용 또한 상당히 절감할 수 있다.

#### 후 기

본 논문에 사용된 기계는 T30 Tap mill machine tools(SPT V30과 동기종)이며 X축의 스톱로크는 0~500, Y축은 0~300, Z축은 0~300 mm까지이다. 또 최대이송속도는 10000 mm/min, 최대 주축 회전속도는 10000 rpm이며 Fanuc 제어를 장착하고 있다.

#### 참고문헌

(1) Bryan, J. B., 1990, "International Status of Thermal Error Research," *Annals of CIRP*, pp.

645~656.

(2) Bryan, J. B., 1982, "A Simple Method for Testing Measuring Machine Tools," *Precision Engineering*, 4(2), pp. 61~69.

(3) Bryan, J. B., 1982, "Method for Testing Measuring Machines and Machine Tools Part 1: Principles and Applications," *Precision Engineering*, V4, pp. 61~69.

(4) Bryan, J. B., 1982, "Method for Testing Measuring Machines and Machine Tools Part 2: Construction Details," *Precision Engineering*, V4, pp. 125~138.

(5) Knapp, W., 1983, "Circular Test for Three-Coordinate Measuring Machines and Machine Tools," *Precision Engineering*, V17, pp. 115~124.

(6) Knapp, W., 1983, "Test of the Three-dimensional Uncertainty of Machine Tools and Measuring Machines and Its Relation to the Machine Errors," *Annals of CIRP*, V32(1), pp. 459~464.

(7) Kunzmann, H., and Waldele, F., 1983, "On Testing Coordinate Measuring Machines(CMM) with Kinematic Reference Standards(KSR)," *Annals of CIRP*, V32(1), pp. 465~468.

(8) Kakino, Y., 1987, "The Measurement of Motion Error of NC Machine Tools and Diagnosis of their Origins by Using Telescoping Magnetic Ball Bar Method," *Annal of the CIRP*, 36(1), pp. 377~380 .

(9) Chen, J. S., Yuan, J. X, Ni, Jun, and Wu, S. M., 1991, "Real time Compensation of Time-variant Volumetric Error on a Machining Center," *Sensor, Control, and Quality Issues in Manufacturing, ASME*, pp. 241~253.

(10) Donmez, M.A., Liu, C.R, and Rarash, M.M., 1987, "A generalized Mathematical Model for Machine Tool Errors," *ASME*, pp. 231~244.

(11) Pahk, H. J. and Kim, Y. S., 1997, "A New Technique for Volumetric Error Assessment for CNC Machine Tools Incorporating Ball Bar Measurement and 3D Volumetric Error Model," *Int. J. Machine Tools and Manufacture*, 37(11), pp. 1583~1596.



- (12) Kwon H. D. and Burdekin, M., 1998, "Measurement and Diagnostics of Machine Tool Errors During Circular Contouring Motions," *Proc Instn Mech Engrs*, Vol. 212 Part B.
- (13) 이상윤, 박준호, 조선휘, 김문상, 1993, "Development of an NC Machine Performance Test and Calibration System," *대한기계학회*, Vol. 17, No. 6, pp. 1431~1440.
- (14) Hai, N., Yuan, J., and NI, J. 1994, "Reverse Kinematic Analysis of Machine Tool Error Using Telescoping Ball Bar," *ASME*, PED-Vol. 68-1, pp. 277~286.
- (15) S. Yang, J. Yuan, J. Ni, 1996, "Accuracy Enhancement of a Horizontal Machining Center by Real-Time Error Compensation," *Journals of Manufacturing Systems*, Vol. 15, No 2, pp. 113~118.
- (16) Yang, S., Yuan, J and Ni, J., 1996, "The Improvement Thermal Error Modeling and Compensation on Machine Tools by CMAC Neural Network," *Int. J. Mach. Tools Manufact*, Vol. 36, No. 4, pp. 527~537 .
- (17) Jun. Ni, 1997, "CNC Machine Accuracy Enhancement Through Real Time Error Compensation," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 119, pp. 717~724.
- (18) 김기훈, 양승환, 2001, "A Reverse Kinematic Approach for Error Analysis of a Machine Tool Using Hemispherical Helix Ball Bar Test," *한국정밀공학회* Vol. 18, No. 3, pp. 143~151.
- (19) Srinivasa, N, 1996, "Spindle Thermal Drift Measurement Using the Laser Ball Bar," *Precision Engineering*, Vol. 18 pp. 118~128.
- (20) Srinivasa, N, 1997, "Prediction of Thermally Induced Time-Variant Machine Tool Error Maps Using a Fuzzy Artmap Neural Network," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 119 pp. 623~629.
- (21) Renishaw Ballbar Diagnostic Manual, *Renishaw Co.*, 1992.
- (22) Random Data, Analysis and Measurement Procedures, Bendat John & Piersol, *Wiley*, 1991.