

# 반구상의 나선형 볼바측정을 통한 공작기계 오차해석의 역기구학적 접근

양승한\*, 김기훈\*\*

## A Reverse Kinematic Approach for Error Analysis of a Machine tool Using Hemispherical Helix Ball bar test

Seung Han Yang\*, Ki Hoon Kim\*\*

### ABSTRACT

Machine tool errors have to be characterized and predicted to improve machine tool accuracy. A real-time error compensation system has been developed based on volumetric error synthesis model which is composed of machine tool errors. This paper deals with new algorithm about verification of machine tool errors. This new algorithm uses a simplified volumetric error synthesis model. This simplified model is constructed with only main components among the error components of the machine. The main error components are analyzed by ball bar test of hemispherical helix. The novel measurement method using ball bar system has many advantages which are more efficient, easier to use than conventional measurement system.

**Key Words** : Machine tool error(공작기계 오차), Volumetric error synthesis model(체적오차 합성모델), Simplified model(축약모델), Ball bar test of hemispherical helix(반구상의 나선형 볼바측정)

### 1. 서론

오늘날 무인생산과 대량생산의 일환으로 공작 기계의 사용이 절대적으로 필요하다. 그러나 여러 가지 요인에 의해서 실제 공작물에는 오차가 상당히 생긴다. 이 오차는 불량률로 직결되기 때문에 불량률을 낮추기 위해서 공작물 가공오차를 줄이려는 노력이 다방면으로 진행되고 있다. 기존의 연구에 의하면 공작물의 오차를 발생시키는 여러 가지 요인 중에서 공작기계 자체의 오차에 의한 것이 60~65%로 가장 큰 것으로 알려져 있다.<sup>(1)</sup> 이러한

공작물의 오차를 줄이기 위한 가장 대표적인 것은 공작기계 자체에서 발생하는 기계의 준정적오차를 모델링하고 이것을 보정하는 것이다. 이를 위해서 공작기계의 준정적오차를 정확하게 측정하고 평가하는 일이 무엇보다 중요하다. 일반적으로 공작기계의 기하학적 오차는 레이저 시스템을 사용하여 측정한다. 레이저 시스템을 사용하여 오차를 측정하면 정확한 오차를 구할 수 있다는 장점이 있는 반면에 여러 가지 단점도 있다. 측정 장비가 상당히 고가의 장비이므로 초기투자비가 많이 들고, 측정장치 설치가 어려우며, 측정시간도 많이 소요되

\* 경북대학교 기계공학과

\*\* 경북대학교 기계공학과 대학원

어 상당한 불편함이 따른다. 게다가 이러한 측정을 수행하기에는 숙련된 기술자가 절대적으로 필요하다는 것도 단점으로 지적된다. 이와 같은 문제의 대안으로 1982년에 Bryan<sup>(2)~(4)</sup>이 공작기계의 오차 평가의 한 방법으로 볼바측정을 새롭게 제안하였고 그 이후로 많은 연구에서 볼바시스템이 사용되었다.<sup>(5)~(13)</sup> 1983년에 Knapp<sup>(5)(6)</sup>은 공작기계와 3차원 측정기(CMM)의 오차를 볼바로 측정하였다. 같은 해에 Kunzmann<sup>(7)</sup>는 선형변위 오차와 직각도 오차를 평가하기 위해서 볼바시스템을 사용하였고, Kakino<sup>(8)</sup> (1987)는 다양한 형태의 운동오차를 측정하고 진단하기 위해서 볼바시스템을 사용하였다. 이와함께 Donmez<sup>(9)</sup>는 공작기계의 체적 정밀도를 유도하기 위해 오차요소를 사용하였다. 그 후, Chen<sup>(10)</sup>은 오차요소를 통해 공작기계 오차에 대한 평가뿐만 아니라 이 오차를 보정하기에 이르렀다. 1997년에는 Pahl<sup>(11)</sup>도 볼바를 이용한 오차평가에 대한 방법을 제안하였다.

이렇게 볼바시스템이 널리 보급될 수 있었던 것 공작기계의 오차를 정기적으로, 자주 확인을 해야 하는 실정에서 저가의 측정 장비임에도 불구하고 빠르고 쉽게 공작기계의 오차를 측정할 수 있다는 장점 때문이었다. 그러나 볼바시스템이 공작기계 오차해석의 많은 진전을 가져왔지만 완전한 해결책은 되지 못하였다. 볼바시스템을 통해서 측정된 데이터는 여러 오차가 조합된 체적오차로 측정되기 때문에 각각의 오차요소에 대한 평가는 이루어지지 않는다. 또, 레이저 시스템에 비교하면 매우 간단하게 측정할 수 있지만 여전히 측정자체가 평면으로 국한되는 볼바측정 고유의 제약조건으로 인한 불편함이 존재하였다.

그러므로 본 논문에서는 반구상의 볼바측정을 통한 공작기계 오차를 검증하는 새로운 알고리즘을 제시하였다. 기존의 볼바측정에 대한 편견을 버리고 3차원 반구상의 나선형 이동경로를 가지는 반구상의 나선형 볼바측정(ball bar test of hemispherical helix)을 처음으로 제시하였다. Bryan등이 반구상상의 평면을 볼바를 이용하여 측정하였다면 이 측정은 X, Y, Z축을 모두 움직이는 반구상의 3차원 측정이다. 또, 볼바측정으로 구한 오차를 체적오차 합성모델을 이용하여 해석하였다. 체적오차 합성모델을 적용할 때에도 기존의 제시된 모델이 아니라 공작기계에 주요하게 작용하는 오차요소만으로 재구성한 축약모델을 사용하였다. 축약모델의 타당성에

관해서는 통계학적 검증을 통해서 입증하였다. 또한 해석한 오차요소와 실제의 오차요소와 비교, 검증을 통해 축약모델의 유용성을 평가하였다. 그 결과 레이저 시스템 대신에 반구상의 볼바측정과 축약모델만으로도 공작기계의 오차를 충분히 분석하였다.

## 2. 축약모델

### 2.1 축약모델의 제안

이론적으로 3축 공작기계에는 21개의 기하학적 오차가 있다. 각 축에 대하여 3개의 병진오차와 3개의 회전오차, 그리고 두 축사이의 직각도 오차가 21개의 기하학적 오차를 구성하고 있다. 그러나 이 21개의 오차요소 모두가 기하학적 오차에 크게 영향을 주지 않는다. 이 중에서 몇몇 오차요소만이 전체 오차에 크게 영향을 미친다는 것이 많은 연구<sup>(9)~(15)</sup>에 의해 드러났다. 기하학적 오차에 가장 크게 영향을 주는 오차요소는 3개의 직각도 오차요소 ( $S_{xy}, S_{yz}, S_{zx}$ ) 와 3개의 선형변위 오차요소 ( $\delta_{xx}, \delta_{yy}, \delta_{zz}$ )로 밝혀졌다. 따라서 이 요소만으로 체적오차 합성모델을 구성하였고, 이 모델을 축약모델(Simplified Model)이라 명명하였다. 이에 비해 모든 오차요소로 구성된 체적오차 합성모델은 완전모델(Complete Model)이라 명명하였다.

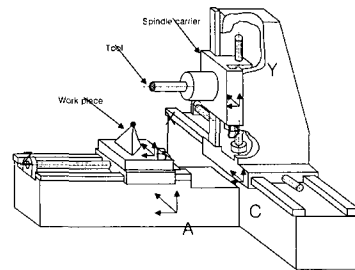


Fig.1 Coordinate Systems on T-10 Machining Center

모든 오차요소를 합성한 체적오차 합성모델은 등변환 행렬로 유도된다. Fig. 1과 같이 구성된 좌표계를 통해서 체적오차 합성모델이 아래와 같이 유도되며<sup>(14)(16)</sup> 식(1)과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta x &= \delta_{xx} + \delta_{xy} - \delta_{xz} + (T_z + L)\epsilon_{yx} + (T_z + L)\epsilon_{yy} \\ &\quad - (T_z + L - z)\epsilon_{yz} - (T_y + y)\epsilon_{zx} - T_y\epsilon_{zy} \\ &\quad + (T_y + y)\epsilon_{zz} - y * S_{xy} \\ \Delta y &= \delta_{yx} + \delta_{yy} - \delta_{yz} - (T_z + L)\epsilon_{xx} - (T_z + L)\epsilon_{xy} \\ &\quad + (T_z + L - z)\epsilon_{xz} + T_x\epsilon_{zx} + T_x\epsilon_{zy} \\ &\quad - (T_x + x)\epsilon_{zz} \\ \Delta z &= \delta_{zy} + \delta_{zx} - \delta_{zz} + (T_y + y)\epsilon_{xx} + T_y\epsilon_{xy} \\ &\quad - (T_y + y)\epsilon_{xz} - T_x\epsilon_{yx} - T_x\epsilon_{yy} \\ &\quad + (T_x + x)\epsilon_{yz} - x * S_{xz} - y * S_{yz} \end{aligned} \quad (1)$$

또 위에서 언급한 6가지 오차요소로 구성된 축약모델 역시 동일한 과정으로 유도되며 그 식은 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned} \Delta x' &= \delta_{xx} - y * S_{xy} \\ \Delta z' &= -\delta_{zz} - x * S_{xz} - y * S_{yz} \\ \Delta y' &= \delta_{yy} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$  : Z축 슬라이드 시스템 B에서 공작물 좌표

$T_x, T_y, T_z$  : 스톨들 캐리어 좌표계 D에서 표준 공구팁의 좌표

L : 공구교환시, 공구웁셋길이

x : X축 좌표계에서 새들의 이동거리

y : Y축 좌표계에서 스톨들 캐리어의 이동거리

z : Z축 좌표계에서 크로스 슬라이드 이동거리

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

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

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

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

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

## 2.2 축약모델의 통계학적 검증

축약모델의 통계학적 검증을 위해서 먼저 레이저측정기를 사용하여 공작기계의 기하학적 오차를 각각 측정했다.(Fig. 2) 여기에서 얻은 데이터로 각 방향의 오차요소를 1차 혹은 필요에 따라 5차의 다항식으로 모델링하였다. 그 결과 선형변위 오차요소는 대체로 직선적인 경향으로 변화하였으므로 1차식으로, 나머지 병진오차와 각도오차는 5차의 다

항식으로 모델링하였고 직각도 오차요소는 상수항으로 측정되었다.

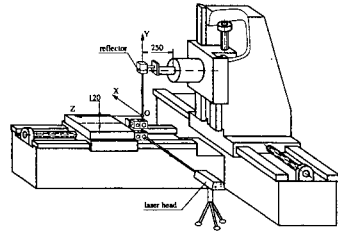


Fig. 2 Experimental Setup for Geometric Error Measurements

다음으로 위에서 구한 결과를 이용해 완전모델에서 축약모델을 뺀 요소의 값이 얼마만큼 0에 가까운지를 검증하였다. 두 모델의 차이는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} D_x &= \Delta x - \Delta x' = \delta_{xy} - \delta_{xz} + (T_z + L)\epsilon_{yx} \\ &\quad + (T_z + L)\epsilon_{yy} - (T_z + L - z)\epsilon_{yz} \\ &\quad - (T_y + y)\epsilon_{zx} - T_y\epsilon_{zy} + (T_y + y)\epsilon_{zz} \\ D_y &= \Delta y - \Delta y' = \delta_{yx} - \delta_{yz} - (T_z + L)\epsilon_{xx} \\ &\quad - (T_z + L)\epsilon_{xy} + (T_z + L - z)\epsilon_{xz} \\ &\quad + T_x\epsilon_{zx} + T_x\epsilon_{zy} - (T_x + x)\epsilon_{zz} \\ D_z &= \Delta z - \Delta z' = \delta_{zy} + \delta_{zx} + (T_y + y)\epsilon_{xx} \\ &\quad + T_y\epsilon_{xy} - (T_y + y)\epsilon_{xz} - T_x\epsilon_{yx} \\ &\quad - T_x\epsilon_{yy} + (T_x + x)\epsilon_{yz} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,

$D_x$  : X축 방향으로의 두 모델의 차이

$D_y$  : Y축 방향으로의 두 모델의 차이

$D_z$  : Z축 방향으로의 두 모델의 차이

$D_x, D_y, D_z$ 가 정규분포를 따른다고 가정하면 이에 대한 통계학적 검증은 다음의 순서로 진행한다.

- 1) 평가를 위해 공작기계가 움직일 수 있는 영역안의 임의의 점 100개를 선정한다.
- 2) 이 선정된 각각의 점을  $D_x, D_y, D_z$ 에 대입시켜서 각 점의 X방향, Y방향, Z방향 오차량을 얻는다.
- 3) 2)번에서 얻은  $D_x, D_y, D_z$  그룹의 평균과 분산 (또는 표준편차)를 구한다.

4) 1)~3)의 과정을 100회 반복수행 하여서  $D_x, D_y, D_z$ 의 평균의 평균과 분산(또는 표준편차)의 평균을 구한다.

위의 과정을 수행한 후 95 %의 유의수준으로 평균이 위치할 신뢰구간을 검증하였다. 표본 평균과 표본 분산을 이용하므로 t-분포를 사용하였고 그 신뢰구간은 다음을 따른다.

$$\bar{x} - \frac{s t_{n, \alpha/2}}{\sqrt{N}} \leq \mu_x \leq \bar{x} + \frac{s t_{n, \alpha/2}}{\sqrt{N}}, \quad n = N - 1$$

<신뢰구간>

여기서,

$N$  : 표본 데이터 수, 10000

$\bar{x}$  : 표본 평균

$s^2$  : 표본 분산

$\mu_x$  : 모 평균

$t_{n, \alpha/2}$  : t-분포

이와 같은 신뢰구간을 설정할 경우  $D_x, D_y, D_z$ 의 신뢰구간은 아래의 Table 1과 같다.

Table 1 Confidence Interval on the Mean of the Simplified Model

	Mean( $\bar{x}$ ) : $\mu\text{m}$	Standard Deviation( $S$ ) : $\mu\text{m}$	Confidence Interval (95%) $\alpha \leq \text{mean} \leq \beta$	
			$\alpha$	$\beta$
$D_x$	1.7	1.8	1.66472	1.73528
$D_y$	5.3	2.5	5.251	5.349
$D_z$	-5.4	1.9	-5.43724	-5.36276

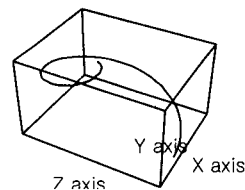
각각의 경우에 대하여 95 %의 유의수준으로 평균을 검증해 보았을 때  $6 \mu\text{m}$  이내의 오차를 가진다. 이상적일 때는 평균이 0으로 접근하여야 하지만  $6 \mu\text{m}$  정도의 축약으로 인한 모델링 오차를 가진다.  $6 \mu\text{m}$  오차가 발생하지만 오관할 정도의 큰 값은 아니며 또한 축약으로 인한 편리함이 더 크다고 판단된다. 또 측정구성오차(mounting error)가 수  $\mu\text{m}$ 에서 수십  $\mu\text{m}$ <sup>(13)</sup>임을 보아도 그리 크지 않는 값을 알 수 있다. 따라서 축약모델을 사용하여도 완전모델과

비교하여서 상당히 높은 신뢰도를 가지는 모델임을 알 수 있다.

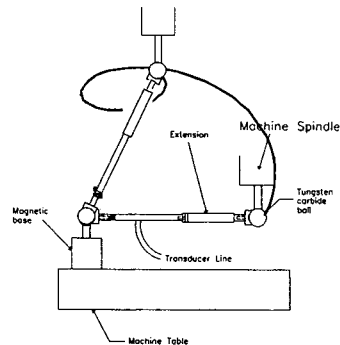
### 3. 볼바측정 가상실험

#### 3.1 반구상의 나선형 볼바측정

지금까지의 볼바측정은 단순히 2차원 평면만을 측정하거나 측정원점의 오차를 고려하지 않기 위해서 단지 원점( $X=Y=Z=0$ )에서만 측정하고 있다.<sup>(8)(11)</sup> 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. 3과 같이 반구상의 나선형 이동 경로를 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.



(a) hemispherical helix in the space



(b) ball bar set up

Fig. 3 Ball bar test of Hemispherical helix in Three dimensions

그래서 반구상의 나선형 불바측정으로 가상의 3차원 불바측정을 가졌다. 3차원상의 불바가 가지는 위치를 고려하여 Fig. 4와 같이 각 점의 기하학적 오차를 포함함 불바식을 만들었다. 원점이  $(x_0, y_0, z_0)$ 이고 반지름이  $R$ 인 불바시스템이 가지는 위치는  $(x, y, z)$ 이지만, 기하학적 오차가 포함되어 실제로는  $(x_0', y_0', z_0')$ 를 원점으로 하고  $(x', y', z')$ 점에 위치한다. 따라서 이상적인 점들과 실제의 점들 사이에는 식(4)와 같은 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} x_0' &= x_0 + \Delta x_0 \\ y_0' &= y_0 + \Delta y_0 \\ z_0' &= z_0 + \Delta z_0 \\ x' &= x + \Delta x \\ y' &= y + \Delta y \\ z' &= z + \Delta z \end{aligned} \quad (4)$$

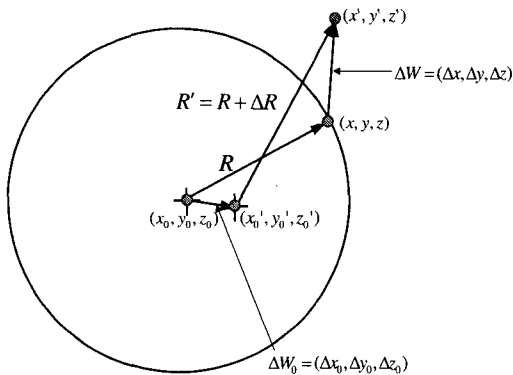


Fig. 4 A Schematic Diagram for Ball Bar Test

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

$$\begin{aligned} R &= \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} \\ R' &= \sqrt{(x'-x_0')^2 + (y'-y_0')^2 + (z'-z_0')^2} \end{aligned} \quad (5)$$

그래서 반지름오차  $\Delta R$ 은

$$\Delta R = R' - R = \frac{\sqrt{(x'-x_0')^2 + (y'-y_0')^2 + (z'-z_0')^2}}{+ (z'-z_0')^2} - R \quad (6)$$

로 구할 수 있다. 여기에 식(4)를 대입하면, 식(7)과 같다.

$$R + \Delta R = \frac{\sqrt{(x-x_0 + \Delta x - \Delta x_0)^2 + (y-y_0 + \Delta y - \Delta y_0)^2 + (z-z_0 + \Delta z - \Delta z_0)^2}}{+ (z-z_0 + \Delta z - \Delta z_0)^2} \quad (7)$$

식(7)의 양변을 제곱하여 2차 이상의 미소값을 무시하면 최종적으로 식(8)과 같다.

$$\begin{aligned} R\Delta R &= (x-x_0)(\Delta x - \Delta x_0) + (y-y_0)(\Delta y - \Delta y_0) \\ &\quad + (z-z_0)(\Delta z - \Delta z_0) \end{aligned} \quad (8)$$

그리고 모든 오차요소를 조합한 완전모델을 이용해서  $(x_0, y_0, z_0)$ 점에서의 오차값을 구하고, 이 오차에 의해서 공작기계의 현재 원점의 위치인  $(x_0', y_0', z_0')$ 를 구한다. 동일하게  $(x, y, z)$ 점에서의 오차값을 계산하여서 현재 위치인  $(x', y', z')$ 도 구한다. 그리고  $(x', y', z')$ 점과  $(x_0', y_0', z_0')$ 점을 이용해서 식(6)에 의해 실제 불바측정에서 얻어지는 것과 동일한  $\Delta R$ 의 값을 구한다.

식(6)로부터 얻어진  $\Delta R$ 을 이용해서 식(8)에 있는  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 에 앞서서 구한 축약모델, 식(2)를 대입하면 다음과 같은 행렬식을 얻는다.

$$Y = AX, \quad (9)$$

여기서,

$$Y = R\Delta R$$

$$A^T = \begin{bmatrix} (x-x_0)^2 \\ (y-y_0)^2 \\ -(z-z_0)^2 \\ -(x-x_0)(y-y_0) \\ -(x-x_0)(z-z_0) \\ -(y-y_0)(z-z_0) \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} d_{xx} \\ d_{yy} \\ d_{zz} \\ S_{xy} \\ S_{xz} \\ S_{yz} \end{bmatrix}, \quad \begin{aligned} \delta_{xx} &= d_{xx} * x \\ \delta_{yy} &= d_{yy} * y \\ \delta_{zz} &= d_{zz} * z \end{aligned}$$

여기서,  $Y$ 의 값은 식(6)로부터 구해지고  $A$ 행렬은 반구상의 나선형 볼바측정시 얻는 3차원 상의 점이며  $X$ 는 구하고자 하는 값이다.

### 3.2 볼바측정 결과와 통계학적 해석

가상의 볼바측정은 다음의 과정을 따른다.

- 1) XZ평면에 놓여진 베드의 가운데 점을 볼바측정 원점으로 잡는다.
- 2) 반지름을 175 mm로 하여 Fig. 5와 같이 반구상의 나선형 볼바측정을 갖는다.
- 3) 반구상의 나선형 형태의 공구경로를 따라 63개의 오차값을 구한다.
- 4) 2)에서 구해진 각점의  $\Delta R$ 을 가지고, 최소자승법을 이용하여  $X$ 의 값을 계산한다.
- 5) 반지름을 175 mm에서 100 mm로 바꾸어서 위의 과정을 동일하게 반복한다.
- 6) 아래의 Fig. 6에서 나타난 번호대로 측정원점을 바꾸어서 1)~5)의 과정을 반복한다.

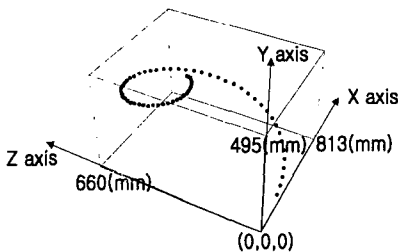


Fig. 5 Trajectory for Ball bar test

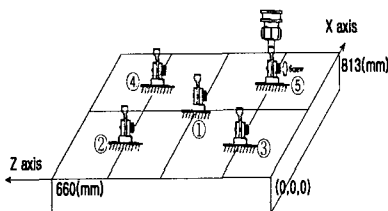


Fig. 6 Origin setup of Ball Bar Test

각각의 볼바측정으로 얻어진  $\delta_{xx}$ ,  $\delta_{yy}$ ,  $\delta_{zz}$ ,  $S_{xy}$ ,  $S_{xz}$ ,  $S_{yz}$ 를 통계 처리하여 평균값을 취하였다. 또 볼바측정으로 얻어진 결과 값과 레이저측정값을 비교하여 Table 2와 같은 결과를 얻었다.

Table 2 Result of Error Elements

	Laser measurement	Ball bar test	Difference between Laser measurement and Ball bar test
$\delta_{xx}$ (mm)	-8.5619E-05*x	-8.7176E-05*x	1.5571E-06*x
$\delta_{yy}$ (mm)	-1.2229E-04*y	-1.1482E-04*y	-7.4623E-06*y
$\delta_{zz}$ (mm)	-8.9221E-05*z	-8.2013E-05*z	-7.2078E-06*z
$S_{xy}$ (rad)	-2.6575E-05	-1.9447E-05	-7.1272E-06
$S_{xz}$ (rad)	3.8588E-05	4.5772E-05	-7.1843E-06
$S_{yz}$ (rad)	-1.1094E-04	-1.1912E-04	-8.1715E-06

### 3.3 결과의 물리적 의미

측약모델을 사용하여 공작기계의 주된 오차요소를 구하였다. 그러나 수치상으로만은 이 값이 얼마나 정확한가에 대해서 이해하기가 어렵다. 그래서 각각의 요소가 가지는 물리적인 의미를 부여하였다.

첫 번째로 선형변위 오차요소 중 하나인  $\delta_{xx}$ 를 살펴보았다.  $\delta_{xx}$ 는 x에 관한 1차 함수로 모델링되었다. 그래서 레이저측정값과 이 값을 1차로 모델링한 직선과 볼바측정으로 구한 값을 Fig. 7에 나타내었다. 두 직선방정식의 최대차이는 X축으로 최대 이동했을 때이며 그 차이는 1.3  $\mu\text{m}$ 이다. 또 레이저로 측정된 점에서의 값과 볼바측정으로 구한 값들과의 차이는 최대오차가 8.4  $\mu\text{m}$ 이고 평균은 2.8  $\mu\text{m}$ 이며 Table 3에 그 결과를 비교하였다. 이것은 두 직선과의 최대오차는 2  $\mu\text{m}$ 이내까지 정확하게 일치하고 실제의 레이저 측정값과의 오차는 최대 8.4  $\mu\text{m}$ 이며, 평균은 2.8  $\mu\text{m}$ 로 상당히 정확한 값을 얻을 수 있음을 증명한다. 따라서 볼바측정으로 얻어진  $\delta_{xx}$ 는 높은 신뢰성을 가진다.

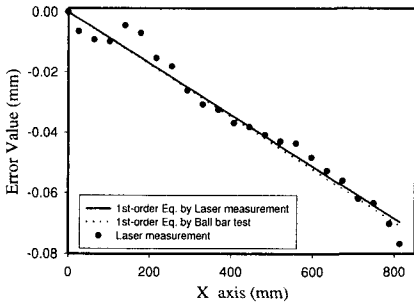


Fig. 7 1st-order Curve Fitting of  $\delta_{xx}$

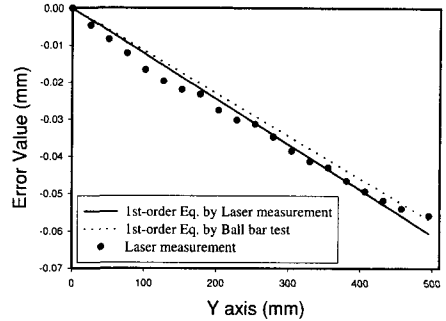


Fig. 8 1st-order Curve Fitting of  $\delta_{yy}$

Table 3 Comparison of the Value,  $\delta_{xx}$

x position (mm)	0	25.4	63.5	101.6	139.7	177.8	215.9	4
Laser measurement ( $\mu\text{m}$ )	0	-6.5	-9.2	-9.9	-4.5	-7.1	-15.4	-18.1
Ball bar test Result ( $\mu\text{m}$ )	0	-2.2	-5.5	-8.9	-12.2	-15.5	-18.8	-22.1
Difference ( $\mu\text{m}$ )	0	-4.3	-3.7	-1.0	7.7	8.4	3.4	4.0
x position (mm)	292.1	330.2	368.3	406.4	444.5	482.6	520.7	558.8
Laser measurement ( $\mu\text{m}$ )	-26.2	-30.8	-32.5	-36.9	-38.2	-40.8	-43.0	-43.6
Ball bar test Result ( $\mu\text{m}$ )	-25.5	-28.8	-32.1	-35.4	-38.7	-42.1	-45.4	-48.7
Difference ( $\mu\text{m}$ )	-0.7	-2.0	-0.4	-1.5	0.5	1.3	2.4	5.1
x position (mm)	596.9	635	673.1	711.2	749.3	787.4	812.8	
Laser measurement ( $\mu\text{m}$ )	-48.3	-52.7	-56.0	-62.0	-63.5	-70.2	-76.8	
Ball bar test Result ( $\mu\text{m}$ )	-52.0	-55.4	-58.7	-62.0	-65.3	-68.6	-70.9	
Difference ( $\mu\text{m}$ )	3.7	2.7	2.7	0.0	1.8	-1.6	-5.9	
<b>Max. Error</b>	<b>8.4 <math>\mu\text{m}</math></b>		<b>Mean of Difference values</b>				<b>2.8 <math>\mu\text{m}</math></b>	

$\delta_{yy}$ ,  $\delta_{zz}$  에 관한 결과는 Table 4에서와 Fig. 8, 9에서 각각 보여준다.

Table 4 Error of  $\delta_{yy}$ ,  $\delta_{zz}$  Elements

	Maximum error of between Laser. measurement and 1st-order Ball bar test ( $\mu\text{m}$ )	Mean of difference values( $\mu\text{m}$ )
$\delta_{yy}$	-5.1 (y=127mm)	2.9
$\delta_{zz}$	-6.4 (z=254mm)	3.3

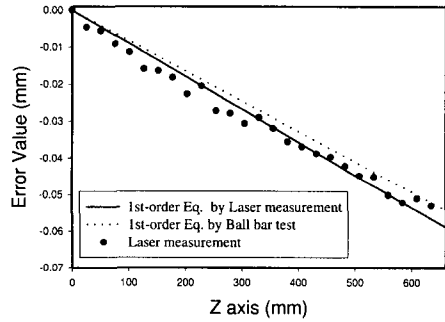


Fig. 9 1st-order Curve Fitting of  $\delta_{zz}$

$\delta_{yy}$ ,  $\delta_{zz}$ 도  $\delta_{xx}$ 와 마찬가지로 레이저 측정점과의 최대오차는 각각 -5.1, -6.4  $\mu\text{m}$ 이고, 오차평균도 2.9, 3.3  $\mu\text{m}$ 으로 상당히 정확하다. 따라서 이 불바측정으로 구해진  $\delta_{yy}$ ,  $\delta_{zz}$ 도 높은 신뢰성을 가진다.

두 번째로 직각도 오차요소 중 하나인  $S_{xy}$ 를 살펴 보았다. 직각도 오차요소의 값은 상수로 측정된다. 그러나 직각도 오차요소는 항상 동작기계가 움직인 거리가 곱해져서 오차량이 계산되어지고 그 물리적인 의미를 가지게 된다.  $S_{xy}$ 도 Y축으로 이동한 거리가 곱해져서 나타나게 된다. 그래서 y에 관한 1차 함수와 같이 취급된다. 불바측정으로 구한  $S_{xy}$ 가 얼마나 정확한지를 알아보기 위해 Y축으로 최대로 이동했을 때의 두 값을 비교하였다. Fig. 10은 불바측정으로 구한  $S_{xy}$ 와 레이저측정으로 얻은  $S_{xy}$ 와의 Y축 방향으로의 값을 보여준다.

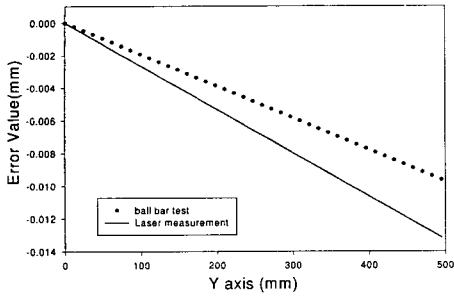


Fig. 10 Variation of  $S_{xy}$  along the Y axis

Table 5 Comparison of the value,  $S_{xy}$

	Result of measurement (rad)	$S_{xy} * y$ (y=495mm)	Maximum error between measurement values ( $\mu\text{m}$ )
$S_{xy}$ (rad) -Laser measurement	-2.65746E-05	-0.0132	<b>-3.6</b>
$S_{xy}$ (rad) -Ball bar test	-1.94474E-05	-0.0096	

Y축 방향으로 최대 이동했을 때 두 측정값의 차이는  $-3.6 \mu\text{m}$ 이다. 최대오차가  $4 \mu\text{m}$ 이내이므로 불바측정으로 구한  $S_{xy}$  요소도 충분한 신뢰성을 가진다. 또  $S_{xz}$   $S_{yz}$ 에 관한 결과는 Fig. 11, 12에서와 Table 6에서 나타나 있다.

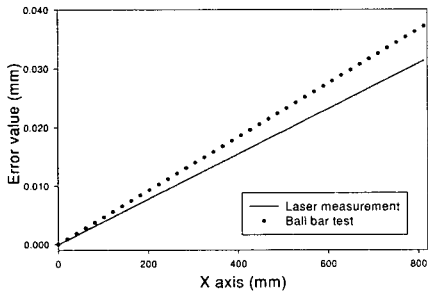


Fig. 11 Variation of  $S_{xz}$  along the X axis

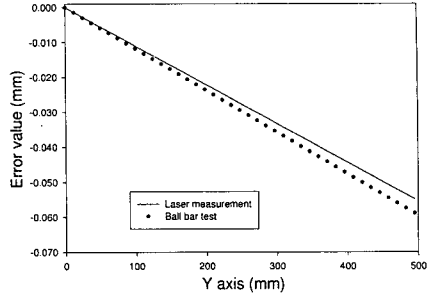


Fig. 12 Variation of  $S_{yz}$  along the Y axis

Table 6 Error of  $S_{xz}$ ,  $S_{yz}$  Elements

		Result of measurement (rad)	$S_{xz} * x$ (x=813 mm)	Maximum error between measurement values ( $\mu\text{m}$ )
$S_{xz}$	Laser	3.85878E-05	0.0314	<b>-5.8</b>
	Ball bar	4.57721E-05	0.0372	
		Result of measurement (rad)	$S_{yz} * y$ (y=495 mm)	Maximum error between measurement values ( $\mu\text{m}$ )
$S_{yz}$	Laser	-1.1094E-04	-0.0549	<b>-4.1</b>
	Ball bar	-1.19116E-04	-0.0590	

$S_{xz}$ ,  $S_{yz}$ 도  $S_{xy}$ 와 마찬가지로 최대오차가 각각  $-5.8 \mu\text{m}$ ,  $-4.1 \mu\text{m}$ 로 미소의 차이만을 가진다. 따라서 불바측정으로 얻은 직각도 오차요소의 값도 매우 높은 신뢰성을 가진다.

#### 4. 결론

반구상의 나선형 불바측정과 축약모델을 이용하여 동작기계의 오차를 해석하고자 한 본 연구를 통해서 지금까지의 내용을 종합하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 95 %의 신뢰도분석을 통하여 동작기계의 기하학적 오차를 유발하는 많은 요소 중에서 주요하게 작용하는 선형변위 오차요소와 직각도 오차요소만으로 전 요소를 사용한 체적오차 합성모델과 상응하는 정확도를 가진 축약모델을 구현하였다.



- 2) 기존의 평면 불바측정에서 벗어나 측정구성오차의 감소뿐 아니라, 전 영역에 대한 측정이 가능한 최적의 반구상의 나선형 불바측정을 처음으로 제시하였다.
- 3) 반구상의 나선형 불바측정의 결과를 체적오차 합성모델에 적용하는 방법을 제안함으로써 동작기계의 오차요소를 해석하는 방법을 제안하였다. 그 결과 선형변위 오차와 직각도 오차요소의 값을 정확히 찾았다.
- 4) 동작기계의 기하학적 오차를 보정하기 위해서 많은 오차요소를 고려하지 않고서 위의 결과로 얻어진 선형변위 오차요소와 직각도 오차요소만으로도 높은 효율을 갖는 보정시스템 개발이 가능하다.

### 참고문헌

1. J. B. Bryan, "International Status of Thermal Error Research," *Annals of CIRP*, pp. 645-656, 1990.
2. J. B. Bryan, "A simple method for testing measuring machine tools," *Precision Engineering*, 4(2), pp. 61-69, 1982.
3. J. B. Bryan, "Method for testing measuring machines and machine tools part 1: Principles and Applications," *Precision Engineering*, Vol. 4, pp. 61-69, 1982.
4. J. B. Bryan, "Method for testing measuring machines and machine tools part 2: Construction Details," *Precision Engineering*, V4, pp. 125-138, 1982.
5. Knapp, W., "Circular Test for Three-Coordinate Measuring Machines and Machine Tools," *Precision Engineering*, Vol. 17, pp. 115-124, 1983.
6. Knapp, W., "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, 1983.
7. Kunzmann, H., and Waldele, F., "On Testing Coordinate Measuring Machines(CMM) with Kinematic Reference Standards(KSR)," *Annals of CIRP*, V32(1), pp. 465-468, 1983.
8. Kakino, Y., "The Measurement of Motion Error of NC Machine Tools and Diagnosis of their Origins by Using Telescoping Magnetic Ball Bar Method," *Annals of the CIRP*, 36(1), pp. 377-380, 1987.
9. Donmez, M.A., Liu, C.R, and Rarash, M.M., "A generalized Mathematical Model for Machine Tool Errors," *ASME*, pp. 231-244, 1987.
10. 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.
11. H. J. Pahk, Y. S. Kim, "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, 1997.
12. H. D. Kwon and M. Burdekin, "Measurement and diagnostics of machine tool errors during circular contouring motions," *Proc Instn Mech Engrs*, Vol. 212 Part B, 1998.
13. Hai, N., Yuan, J., and NI, J. "Reverse Kinematic Analysis of Machine Tool Error Using Telescoping Ball Bar," *ASME, PED-Vol. 68-1*, pp. 277-286, 1994.
14. S. Yang, J. Yuan, J. Ni, "Accuracy Enhancement of a Horizontal Machining Center by Real-Time Error Compensation," *Journals of Manufacturing Systems*, Vol. 15, No. 2, pp. 113-118, 1996.
15. S. Yang, J. Yuan, J. Ni, "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, 1996.
16. Jun. Ni "CNC Machine Accuracy Enhancement Through Real Time Error Compensation," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 119, pp. 717-724, 1997.
17. Random Data, Analysis and Measurement Procedures, Bendat John & Piersol, Wiley, 1991.
18. Renishaw Ballbar Diagnostic Manual, Renishaw Co., 1992.