

# 기상계측 시스템을 이용한 머시닝센터의 기하오차 모델링 및 오차측정

이재종\*, 양민양\*\*

## Modeling and Measurement of Geometric 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 and thermal errors of the machine tools. Therefore, a key requirement for improving the machining accuracy and product quality is to reduce the geometric and thermal errors of machine tools. This study models geometric error for error analysis and develops on-machine measurement system by which the volumetric errors are measured. The geometric error is modeled using form shaping function (FSF) which is defined as the mathematical relationship between form shaping motion of machine tool and machined surface. The constant terms included in the error model are found from the measurement results of on-machine measurement system. The developed on-machine measurement system consists of the spherical ball artifact (SBA), the touch probe unit with a star type stylus, the thermal data logger and the personal computer. 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.

**Key Words** : On-Machine Measurement(기상계측), Form shaping function (형상창성함수), Spherical Ball Artifact (구 측정구), Geometric Error (기하오차)

### 1. 서론

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

정적오차(quasi-static error)와 동적오차(dynamic error)로 구분한다. 동적오차는 기계의 진동, chatter 및 스피들 유니트의 진동에 의해서 발생하는 오차이다. 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.

이러한 오차는 공작기계의 구조계, 이송계, 주축계의 변형을 유발시킴으로써 공작기계의 가공정도에 직접적인 영향을 미쳐 가공정도를 저하시킨다[1,2]. 열변형 오차는 절삭가공 중에 발생하는 이송축, 스피들 유니트, 모터 등의 열원에 의해서 나타나기 때문에 작업중에 신속한 측정/보정이 필요하다. 기하오차는 공작기계 조립과 운동기구의 진직도, 직각도, 각변위 오차 및 위치오차와 아베 옵셋에 의해서 영향을 받기 때문에 공간상 오차측정이 필요하고, 또한 공작기계의 노후상태에 따라 다르기 때문에 반복적인 오차측정이 요구된다.

기하오차를 측정·해석하기 위한 방법으로는 원래적 시험법[3], 기구적 볼바를 이용하는 방법이 있으며, 공작기계의 구조를 기하학적 링크기구(link mechanism)로 가정하고, 각 링크간의 상대운동을 동차변환행렬을 이용하여 모델링한 후 레이저간섭계[4]로 측정된 단위오차를 이용하여 공간상의 오차를 해석하는 연구가 주류를 이루고 있다. 그러나, 레이저간섭계를 이용한 방법은 측정정도는 우수하나 측정으로 인한 소요시간이 길고, 측정을 위해서 작업자의 간섭과 작업지연을 초래한다는 단점이 있다. 열변형 오차의 측정·해석방법은 절삭가공시 발생하는 다양한 형태의 발생열을 최소화할 수 있도록 공작기계의 구조설계를 개선하여 가공정도를 높이기 위한 연구와 열변형 오차를 측정하여 보정하는 연구가 있으나 최적설계로도 열변형 오차를 피할 수 없기 때문에 후자의 연구가 있다[4,5,6]. 이외에 회기분석법이나 신경회로망을 이용한 발생온도와 변위와의 관계 모델을 이용하여 온도변화에 따른 열변형 오차를 예측하는 방법이 있다. 그러나, 공작기계의 정적오차는 X, Y, Z축 방향의 3차원 공간상에서 다르게 나타나고, 특히, 열변형 오차는 비선형 특성을 가지고 있고, 시간에 따라 지배적인 영향을 받기 때문에 정확한 오차측정 및 오차보정을 위해서는 작업 중에 신속한 오차측정방법이 필요하다.

이러한 관점에서 본 논문에서는 기상계측방법으로 공작기계의 기하오차를 신속하게 측정할 수 있고, 측정으로 인한 절삭작업의 제약 및 측정시간을 최소화하면서, 동시에 고신뢰성을 가지고 공작기계의 오차를 측정할 수 있는 기상계측시스템을 제안했다. 또한, 제안된 기상계측 시스템을 이

용하여 작업공간상의 기하오차를 측정할 수 있는 기하오차모델을 제시했고, 제시된 오차모델을 이용하여 기하오차 측정실험을 수행했다. 이러한 실험결과 기상계측 방법으로 공간상의 기하오차를 신속하게 측정할 수 있었다.

## 2. 기하오차 모델링

기하오차 모델링은 공작기계의 가공형상을 모델링하기 위해 D.N. Reshetov [7]에 의해서 제안된 형상창성함수를 이용했다. 형상창성함수는 공작기계를 강체링크의 연쇄구조(link mechanism)로 보고, 각 링크가 가지고 있는 위치오차와 각변위 오차를 고려하여 동차변환 행렬로 표현하고, 각 링크의 동차변환행렬을 이용하여 공작기계의 오차를 모델링하는 방법이다. Harumoto와 Inasaki [8]는 형상창성함수에 포함된 각각의 단위오차에 대해서 DBB(double ball bar)의 측정값을 이용하여 모델링을 했으나 이 방법은 별도의 오차측정이 요구되기 때문에 본 논문에서는 위치오차와 각변위 오차를 위치좌표의 함수로 가정하여 오차 모델링을 했고, 기상계측 시스템을 이용하여 오차 모델에 포함된 오차 파라미터를 산출하는 방법을 이용하여 기하오차를 측정할 수 있는 모델을 구축했다.

### 2.1 형상창성함수 모델

본 논문에서 사용된 형상창성함수는 “공작물에 대한 공구의 궤적이 공작기계를 구성하고 있는 주축 스피들 유니트, 베드(bed), 테이블(table), 칼럼 등 인접한 각 구성요소의 상대운동의 중첩으로 형성된다”는 개념을 이용하여 공작기계의 운동특성과 가공형상과의 관계를 수학적으로 해석한 것이다. 공작기계의 구조를 가공물에서 시작하여 공작기계 구성요소, 절삭공구로 연결되는 강체의 링크구조로 가정하면 공작기계의 운동특성을 인접한 강체간의 상대운동의 중첩으로 표현된다. 또한, 각 강체의 기하오차 및 절삭공구의 형상을 모델링함으로써 가공면의 형상오차 및 공작기계의 기하오차를 해석할 수 있다. 즉, 연쇄구조의 인접한 각 구성요소 간의 병진운동과 회전운동을 고려한 좌표코드(coordinate code)와 구조코드(structural code)를 이용하여 표현함으로써 공작기계의 구조형태를 수학적으로 표현할 수 있다.

좌표코드는 구성요소를 강체로 가정하여 절대 운동을 하는 구성요소만을 고려하여 가공물에서 공구까지의 연쇄순으로 식(1)과 같이 표현된다.

$$k = k_1 k_2 k_3 k_4 \dots k_n \quad (1)$$

여기서,  $n$ 은 연쇄링크의 갯수이고,  $k_i$ 는  $i$ 번째 링크의 기본 운동특성을 나타낸다. 기본운동특성은 구성요소가 6자유도를 가진 강체이기 때문에 3개의 병진운동과 3개의 회전운동이 가능하지만

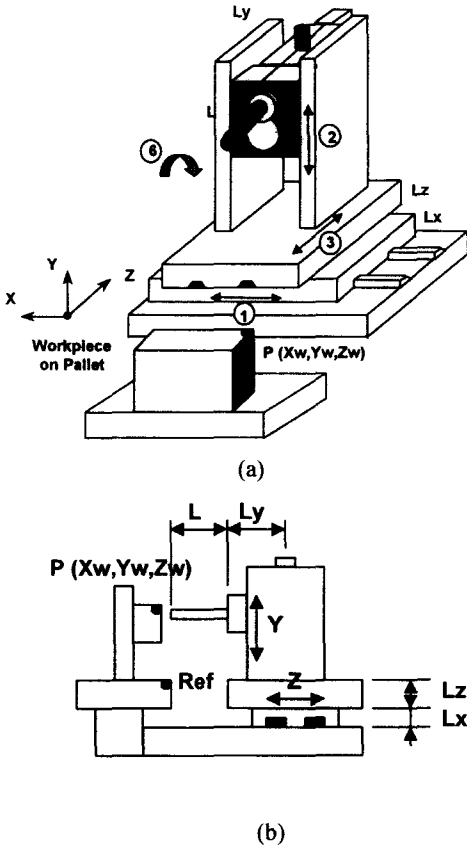


Fig.1 Model of horizontal machining center

공작기계의 구성요소는 다른 구성요소에 의해서 제약을 받으므로 1자유도의 운동특성만 가진다. 즉, 1~3은 X, Y, Z축 방향의 병진운동을 의미하고, 4~6은 X, Y, Z축 중심의 회전운동을 나타낸다. 구조코드는 설정된 좌표코드를 기준으로 베드와 같이 절대운동이 없는 정지된 구성요소를 포함하여 공작기계의 구조특성을 나타낸 것이다. 이러한 관계로부터 Fig.1과 같은 수평형 머시닝센터의 좌표

코드  $k=1326$ 이고, 구조코드는 가공물을 시작으로 공구의 연쇄구조를 형성할 때 베드를 먼저 만나기 때문에  $K=01326$ 이 된다.

이와 같이 공작기계에서 공구의 운동특성은 식(1)과 같이 각 구성요소의 좌표계를 설정하고, 가공물의 좌표계를 기준으로 각 인접한 구성요소 사이의 상대운동에 대응하는 동차변환행렬을 순차적으로 적용함으로써 공구 좌표계에서의 절삭점의 위치벡터는 최종적으로 공작물 좌표계로 변환된다. 즉, 공간상에서 서로 인접한 두 시스템의 위치벡터  $r_{i-1}, r_i$ 의 관계는 동차변환행렬  $A$ 를 이용하면 다음 식(2)와 같이 표현되고, 동차변환행렬  $A$ 는 식(3)과 같이 회전운동과 병진운동을 포함한다.

$$r_{i-1} = A_{i-1,i}^j r_i \quad (2)$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

전체시스템에 대해서 동차변환행렬을 적용하면 형상창성함수  $r_0$ 는 다음 식(4)와 같다.

$$r_0 = A_{0,l} r_l \quad (4)$$

$$A_{0,l} = \prod_{i=1}^l A_{i-1,i}^j = A_{0,1}^j A_{1,2}^j A_{2,3}^j A_{3,4}^j \dots A_{l-1,l}^j$$

여기서,  $r_l$ 은 공구의 위치벡터이고,  $r_0$ 는 가공물의 위치벡터를 나타내며,  $l$ 은 링크의 갯수이다.  $A^1, A^2, A^3$ 는 X, Y, Z축 방향의 병진운동에 따른 동차변환행렬이고,  $A^4, A^5, A^6$ 은 X, Y, Z축 중심의 회전운동에 따른 동차변환행렬을 의미하며, Table 1과 같다. 이러한 관계로부터 형상창성함수는 다음 식(5)와 같이 상대운동만의 함수로 표현된다.

$$r_0 = A^1(x) A^3(z) A^2(y) A^6(z) e \quad (5)$$

절삭공구 날의 형상을 정의하여 식(5)의 공구 위치벡터  $e$ 에 적용하면 공작기계에서 가공되는 제품의 가공형상 모델링이 가능하며, 오차측정용 모델에서는 측정용 프로브를 사용하기 때문에 Z축 방향의 회전운동은 무시했고, 공구의 위치벡터  $e$ 도 단위벡터로 가정했다. 또, 공작기계의 오차

는 구성요소의 형상에 의해서 달라지기 때문에 식 (5)에 공작기계 구성요소의 형상에 대한 옵션을 고려하면 형상창성함수는 다음 식(6)과 같이 표현 된다.

$$r_0 = A^1(-x_w)A^3(-z_w)A^2(-y_w)A^2(-L_x - L_z) \\ A^2(L + L_y)A^1(x + x_w)A^2(L_x)A^3(z + z_w) \\ A^2(L_z)A^2(y + y_w)A^3(-L - L_y)e \quad (6)$$

여기서,  $x_w, y_w, z_w$ 는 가공물의 옵션값이고,  $L_x$ 는 공작기계 X축 볼스크류와 Z축 볼 스크류 사이의 거리를 나타내고,  $L_z$ 는 Z축 볼스크류와 Y축 최하단점 사이의 거리이다.  $L$ 은 접촉식프로브의 길이이고,  $L_y$ 는 Y축 볼스크류와 Z축 방향의 스핀들헤드 끝부분까지의 거리이다. 식(6)에서  $A^1(\pm x_w), A^2(\pm y_w), A^3(\pm z_w), A^2(\pm L_x), A^2(\pm L_z), A^3(\pm L_y), A^3(\pm L)$ 은 상대운동을 의미하지 않고

Table 1 Homogeneous transformation matrices

	Axis	FS Code k	Homogeneous TR Matrix
Translation Error	X	1	$A^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
	Y	2	$A^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
	Z	3	$A^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Rotational Error	X	4	$A^4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
	Y	5	$A^5 = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
	Z	6	$A^6 = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

공작기계의 형상에 따른 좌표계의 이동을 의미한다.

### 2.2 기하오차의 모델링

공작기계의 기하오차는 공작기계를 구성하고 있는 각 구성요소가 가지고 있는 기하오차에 의해서 나타나기 때문에 기하오차는 다음 식(7)과 같이  $r_0$ 의 미분형태로 표현함으로써 각 구성요소가 가지고 있는 오차를 고려한 전체시스템의 오차특성을 표현할 수 있다.

$$\Delta r_0 = \Delta(A_{0,i}r_i) \\ = \Delta(A_{0,1}^1 A_{1,2}^2 \dots r_i) \\ = \Delta A_{0,i}r_i + A_{0,1}^1 \Delta A_{1,i}r_i + \dots + A_{0,i} \Delta(r_i) \quad (7)$$

식(7)에서 미분항  $\Delta$ 가 미소하기 때문에 각 구성요소의 이송축 오차  $\epsilon_i$ 로 고려할 수 있고, 가공면상의 오차벡터는 식(8)과 같이 표현된다.

$$\Delta r_0 = \epsilon_0 A_{0,i}r_i + A_{0,1}^1 \epsilon_1 A_{1,2}^2 A_{2,i}r_i + \dots + A_{0,1}^1 A_{1,2}^2 A_{2,i} \epsilon_i r_i \\ = \epsilon_0 (A_{0,1}^1 A_{1,2}^2 \dots A_{i-1,i}^i) r_i + A_{0,1}^1 \epsilon_1 (A_{1,2}^2 A_{2,3}^3 \dots A_{i-1,i}^i) r_i \\ + \dots + A_{0,1}^1 A_{1,2}^2 \dots A_{i-1,i}^i \epsilon_i r_i \quad (8)$$

여기서,  $\epsilon_i$ 는 구성요소가 강체라는 가정하에  $i$ 번째 구성요소가 가지고 있는 회전오차와 병진오차가 포함된 오차행렬이다.

$$\therefore \epsilon_i = \begin{bmatrix} 0 & -\gamma_i & \beta_i & \delta_{x_i} \\ \gamma_i & 0 & -\alpha_i & \delta_{y_i} \\ -\beta_i & \alpha_i & 0 & \delta_{z_i} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (i = x, y, z) \quad (9)$$

식(6)과 식(8)로부터 식(9)의 이송축 오차를 적용한 후 정리하면 X, Y, Z축에 대한 기하오차 모델식은 다음과 같다.

$$\Delta x = \delta_{x_0} + \delta_{x_1} + \delta_{x_2} - \gamma_x L_x \\ - (L + L_y)(\beta_x + \beta_y + \beta_z) - L_z(\gamma_x + \gamma_z) \\ - (y + y_w)(\gamma_x + \gamma_z) + \beta_x(z + z_w) \quad (10a)$$

$$\Delta y = \delta_{y_0} + \delta_{y_1} + \delta_{y_2} \\ + (L + L_y)(\alpha_x + \alpha_y + \alpha_z) - \alpha_x(z + z_w) \quad (10b)$$

$$\Delta z = \delta_{z_0} + \delta_{z_1} + \delta_{z_2} + \alpha_x(L_x + L_z) + \alpha_z L_z \\ + (y + y_w)(\alpha_x + \alpha_z) \quad (10c)$$

식(10)에 포함된 위치오차와 각변위 오차는 각각의 오차가 공간상의 위치에 따라 일정하다는 가정하에서 레이저간섭계나 DBB시스템으로 측정된

측정오차를 적용해서 공간상의 오차모델로 이용할 수 있으나 이러한 측정기에서 측정된 위치오차와 각변위 오차는 이송축의 직각방향에 대해서 아베 옵셋과 직각방향의 이송축의 특성으로 인해 Fig.2 와 같이 다르게 나타나기 때문에 이를 고려한 오차모델이 필요하다.

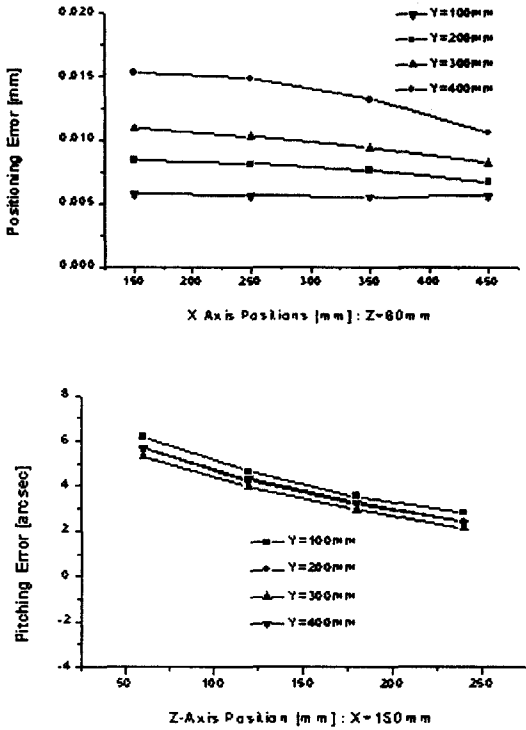


Fig.2 Variation of the positioning errors and pitching errors along the moving axes

식(10)에 포함된 각각의 오차를 X, Y, Z방향의 위치함수로 표현함으로써 기상계측시스템에 사용할 수 있는 오차모델링이 가능하다. 본 논문에서 대상으로 한 머시닝센터의 위치오차와 각변위 오차는 측정실험결과 이송위치에 따라 선형특성을 가지고 있는 위치함수오차(position dependent error)이기 때문에 선형으로 가정했다. 즉,  $\delta_{xx} = ax$ ,  $\delta_{yy} = by$ ,  $\delta_{zz} = cz$  (a,b,c는 비례상수), 각변위 오차는  $\alpha_x = x \frac{d\alpha}{dx}$ ,  $\beta_x = x \frac{d\beta}{dx}$ ,  $\gamma_x = x \frac{d\gamma}{dx}$  와 같고, Y, Z축 방향의 각변위 오차도 동일하게 표현할 수 있다. 진직도 오차는 두 축사이의 각변위 오차에 의해서

나타나기 때문에 Y, Z축의 각변위에 의한 X축 방향의 진직도 오차는

$$\delta_{yy} = -\int_0^y \gamma_y dy = -\int_0^y y \frac{d\gamma}{dy} dy = -\frac{y^2}{2} \frac{d\gamma}{dy}$$

$$\delta_{zz} = \int_0^z \beta_z dz = \int_0^z z \frac{d\beta}{dz} dz = \frac{z^2}{2} \frac{d\beta}{dz} \text{ 와 같이 2차함수로 표}$$

현되고, Y, Z축 방향의 진직도 오차도 동일하게 표현할 수 있다. 직각도 오차는 각 축방향의 위치에 영향을 받지 않기 때문에 상수항으로 고려했다. 이러한 오차특성을 식(10)에 대입한 후 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta x &= -\frac{y^2}{2} \frac{d\gamma}{dy} + \frac{z^2}{2} \frac{d\beta}{dz} - \frac{dy}{dx} xy - \frac{dz}{dx} yz + \frac{d\beta}{dx} xz + \\ &\left( z_w \frac{d\beta}{dx} - y_w \frac{d\gamma}{dx} + a - L_x \frac{d\gamma}{dx} - (L+L_y) \frac{d\beta}{dx} - L_z \frac{d\gamma}{dx} \right) x \\ &- (L+L_y) \frac{d\beta}{dy} y - \left( (y_w + L_z) \frac{d\gamma}{dz} + (L+L_y) \frac{d\beta}{dz} \right) z \\ \Delta y &= \frac{x^2}{2} \frac{d\gamma}{dx} - \frac{z^2}{2} \frac{d\alpha}{dz} - \frac{dx}{dz} xz \\ &- \left( (z_w - L - L_y) \frac{d\alpha}{dx} \right) x + \left( b + (L+L_y) \frac{d\alpha}{dy} \right) y \\ &+ (L+L_y) \frac{d\alpha}{dz} z \\ \Delta z &= -\frac{x^2}{2} \frac{d\beta}{dx} + \frac{y^2}{2} \frac{d\alpha}{dy} + \frac{dx}{dx} xy + \frac{d\alpha}{dz} yz \\ &+ \left( (L_x + L_z) \frac{d\alpha}{dx} + y_w \frac{d\alpha}{dx} \right) x \\ &+ \left( c + L_z \frac{d\alpha}{dz} + y_w \frac{d\alpha}{dz} \right) z \end{aligned} \tag{11}$$

위 식에서 X, Y, Z 이외의 항은 상수항이므로, X, Y, Z에 대해서 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{2}f_1 & \frac{1}{2}f_2 & f_3 & f_4 & f_5 & f_6 + K_1 & -(L+L_y)f_7 & K_2 & 0 \\ \frac{1}{2}g_1 & 0 & -\frac{1}{2}g_2 & 0 & 0 & g_3 & -(L+L_y)g_4 & g_5 + (L+L_y)g_6 & K_3 & 0 \\ -\frac{1}{2}h_1 & \frac{1}{2}h_2 & 0 & h_3 & h_4 & 0 & (L_x + L_z)h_5 & 0 & h_6 + L_z h_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^2 \\ y^2 \\ z^2 \\ xy \\ yz \\ xz \\ x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \tag{12}$$

$$[e] = [T][x]$$

여기서,  $K_1 = (L_x + L_z)f_3 - (L + L_y)f_5$ ,  
 $K_2 = L_z f_4 - (L + L_y)f_2$ ,  $K_3 = (L + L_y)g_2$  이고,  $[T]$   
 는 17 개의 상수항을 가지고 있기 때문에 공간상  
 에서 17 점의 X, Y, Z 축의 좌표와 각 좌표점에서  
 측정된 오차를 이용하면 상수  $f, g, h$ 를 산출할  
 수 있고, 이를 이용함으로써 기상계측 시스템에서  
 이용할 수 있는 오차모델링이 가능하다. 식(12)에  
 17 점의 측정좌표와 측정오차를 대입한 후  
 $f, g, h$ 에 대해서 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta x_i &= -\frac{1}{2}y_i^2 f_1 + \left[ \frac{1}{2}z_i^2 - (L + L_y)z_i \right] f_2 \\ &+ [x_i y_i + (L_x + L_z)x_i] f_3 + (y_i z_i + L_z z_i) f_4 \\ &+ [x_i z_i - (L + L_y)x_i] f_5 + x_i f_6 - (L + L_y)y_i f_7 \\ \Delta y_i &= \frac{1}{2}x_i^2 g_1 + \left[ -\frac{1}{2}z_i^2 + (L + L_y)z_i \right] g_2 \\ &+ [x_i z_i - (L + L_y)x_i] g_3 + y_i g_4 + (L + L_y)y_i g_5 \\ \Delta z_i &= -\frac{1}{2}x_i^2 h_1 + \frac{1}{2}y_i^2 h_2 + [x_i y_i + (L_x + L_z)x_i] h_3 \\ &+ (y_i z_i + L_z z_i) h_4 + z_i h_5 \end{aligned} \quad (13)$$

위 식(13)에서 구 측정구의 기준점에서 측정된  
 X, Y, Z 축 방향의 측정오차 벡터와 기준점의 위치  
 좌표 행렬  $[X], [Y], [Z]$ 을 이용하여 상수행렬  
 $[f], [g], [h]$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} [f] &= (X^T X)^{-1} X^T [e_x] \\ [g] &= (Y^T Y)^{-1} Y^T [e_y] \\ [h] &= (Z^T Z)^{-1} Z^T [e_z] \end{aligned} \quad (14)$$

따라서, 위 식(14)의 상수행렬  $[f], [g], [h]$ 는  
 본 논문에서 제안한 기상계측 시스템과 구 측정구  
 를 이용하여 측정된 공간상의 각 기준위치의 좌표  
 와 오차벡터를 이용하여  $[f], [g], [h]$ 를 산출하여  
 기하오차 모델인 식(13)에 대입함으로써 공작기계  
 공간상의 위치에 따른 기하오차를 측정할 수 있다.

### 3. 기상계측 시스템

공작기계의 기하오차와 열변형 오차를 측정/해  
 석하기 위해서 접촉식 프로브와 구 측정구를 이용

하여 Fig.3과 같은 기상계측 시스템을 개발했으며,  
 개발한 시스템은 구 측정구, 온도측정장치, 접촉식  
 프로브, 공작기계 인터페이스 유니트와 측정결과  
 해석을 위한 오차해석 소프트웨어로 구성되어 있  
 다.

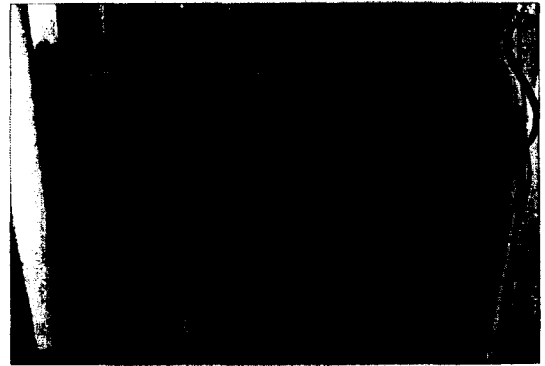


Fig.3 Experimental set-up on the horizontal machining center

기상계측 시스템을 이용하여 공작기계 공간상  
 의 오차를 측정하기 위해서는 측정값의 기준이 되  
 는 측정구(artifact)가 필요한데 본 논문에서는  
 Fig.3에 나타낸 바와 같이 고정도의 구를 이용한  
 구 측정구(spherical ball artifact)를 고안하여 이용했  
 다. 고안된 구 측정구는 진구도가  $0.4\mu\text{m}$ 이하인 4  
 개의 구를 공작기계의 작업영역을 고려하여 X, Y,  
 Z축 방향에서 일정한 간격으로 설치하여 공간상  
 의 오차를 측정할 수 있게 제작된 일종의 마스터  
 측정장치이다. 구는 열에 의한 영향을 최소화하  
 기 위해서 슈퍼인바(super invar : Ni 31%-Co5%,  
 $\alpha = 1.2e-6$ )를 사용하여 구를 고정했고, 3차원 측정  
 기를 사용하여 기준구(#1)를 중심으로 각 구사이  
 의 거리를 측정하여 기상계측 시스템의 기준값으  
 로 이용했다. 고안된 구 측정구는 1) 진구도가  
 우수한 구를 사용하기 때문에 장치의 설치로 인한  
 설치오차가 무시될 정도로 작고, 2) 동일한 팔렛에  
 가공물과 반대방향으로 설치하여 절삭작업으로 인  
 한 측정상의 간섭을 줄일 수 있으며, 3) 기계 위  
 에서 가공과 정적오차(기하오차, 열변형 오차)의 측  
 정이 가능하기 때문에 기상계측 시스템을 구현할  
 수 있다.

기상계측 시스템에 사용된 측정장치는 촉침자  
 (stylus)를 사용한 접촉식프로브와 레이저를 사용한  
 비접촉식프로브가 이용되는데 측정정도의 측면에

서 접촉식프로브가 우수하기 때문에 접촉식프로브를 사용했다. 접촉식프로브는 측정정도가 1 $\mu$ m (2 $\sigma$ )이며, 촉침자를 십자형(star type stylus)으로 구성하여 프로브를 구성했고, 기초실험을 통해서 접촉식 프로브가 가지고 있는 오버트레이블(over travel) 오차, 프로브 로빙오차와 측정오차를 보상했다. 또, 접촉식프로브는 촉침자가 구이기 때문에 경사면을 측정할 경우 측정값이 실제 값과 다르므로 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 $\mu$ m이하인 고정도의 기준구(직경:1 inch)의 중심좌표를 측정하는 방법을 이용했다[6].

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 제어가 인터페이스 유닛(MI7)에 의해서 연계되어 있기 때문에 접촉점의 위치좌표를 검출할 수 있다. 이러한 측정원리를 이용하여 구 측정구에 사용된 구의 중심좌표를 측정하여 공작기계의 기하오차를 해석했다. 구의 중심좌표는 측정오차를 최소화하기 위해서 구 측정구에 셋업되어 있는 구 표면의 6점의 측정값(좌표값)과 최소자승법(least-square fitting)을 이용하여 X, Y, Z방향의 좌표를 측정했다.

측정은 Fig.5와 같이 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/구x 4구=12점의 중심좌표값이 측정된다. 따라서, 측정된 중심좌표값과 구 측정구의 CMM 측정값으로부터 다음 식(15)과 같이 공간상에 존재하는 기준점의 오차를 산출하고, 산출된 오차를 기하오차모델에 대입함으로써 공작기계가 가지고 있는 공간상의 기하오차 해석이 가능하다.

$$\text{기준점의 오차 } \delta_{xyz}|_i =$$

$$(\text{측정좌표}|_{i+1} - \text{측정좌표}|_i) - \text{CMM측정값}|_i \quad (15)$$

본 측정시스템의 측정은 기계상에서 이루어지고, 작업 중에 측정장치를 설치할 필요가 없으며, 측정과 동시에 측정결과를 이용하여 오차보정이

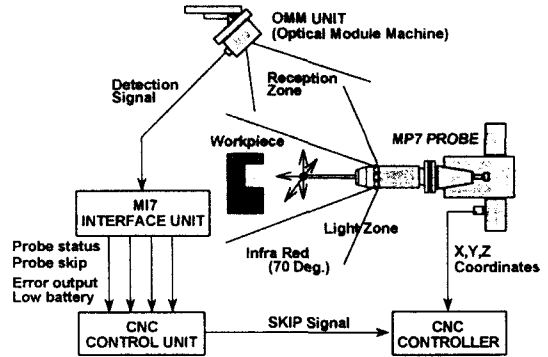


Fig.4 Measurement principle of touch probe unit

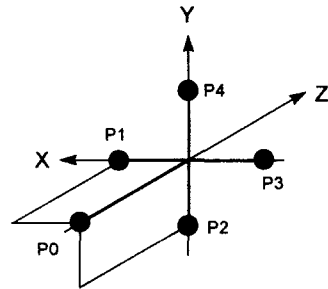


Fig.5 Configuration of the star type probe

가능하기 때문에 측정시간의 단축, 신속한 오차 측정 및 생산성을 높일 수 있는 특징이 있다.

Table 2 Specifications of the inspection 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( $\mu$ m) = 0.5 + L/700 U3( $\mu$ m) = 0.8 + L/700
Spherical Ball Artifact	Sphericity : 0.1 $\mu$ m ~ 0.4 $\mu$ m Diameter : 25.3998mm~25.4mm Super Invar : $\alpha = 1.2e-6$

#### 4. 측정실험 및 결과

기하오차 측정은 공작기계에서 발생하는 열원을 최소화한 상태에서 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 기하오차 모델식을 이용하여 공간상의 기하오차를 측정했다. 실험장치의 구성은 다음 Table 2와 같다.

실험방법은 십자형 프로브의 3개의 축침자를 사용하여 구 측정구의 기준구(#1)의 중심좌표를 측정하여 십자형 프로브의 자세보상을 한 후 순차적으로 구 측정구의 다른 구의 중심좌표를 측정했다. 측정실험은 구 측정구에 대해서 3개의 축침자를 모두 이용하여 측정하기 때문에 하나의 구를 측정했을 때 3개의 중심좌표를 구했고, 기준구를 중심으로 측정된 구 사이의 측정값과 3차원측정기의 측정값을 이용하여 각 기준점의 오차  $\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i (i=1..9)$ 를 구했다. 따라서, 측정된 기준점의 오차와 3차원측정기에서 측정된 각 기준점의 중심좌표를 이용하여 기하오차 모델식의 상수행렬을 구했고, 구해진 상수행렬을 이용하여 공작기계 작업공간상의 기하오차를 측정했다. 다음 Fig.6은  $X=225\text{mm}$ 와  $X=375\text{mm}$ 에서 YZ평면으로 측정된 X축 방향의 기하오차를 나타낸 것이고, 다음 Fig.7은  $Y=100\text{mm}$ 와  $Y=200\text{mm}$ 에서 XZ평면으로 측정된 Y축 방향의 기하오차를 나타낸 것이다. 또, Fig.8은  $Z=175\text{mm}$ 와  $Z=200\text{mm}$ 에서 XY평면으로 측정된 Z축 방향의 기하오차를 나타낸 것이다.

실험결과를 볼 때 측정된 각 축 방향의 기하오차는 위치에 따라 유사한 오차특성을 가지고 있고, X, Y축 방향의 오차는 비교적 변화가 적게 나타났으며, Z축 방향의 오차는 비교적 큰 변화를 보였다. 이러한 측정결과로부터 공작기계의 위치에 따른 X, Y, Z축의 오차변화는 구조적으로 공작기계 이송축의 양단에서 오차가 크게 나타남을 알 수 있다. 이러한 기하오차는 공작기계의 구조 등에 의해서 나타나기 때문에 커스텀메크로 변수를 이용하여 오차보정이 가능하다.

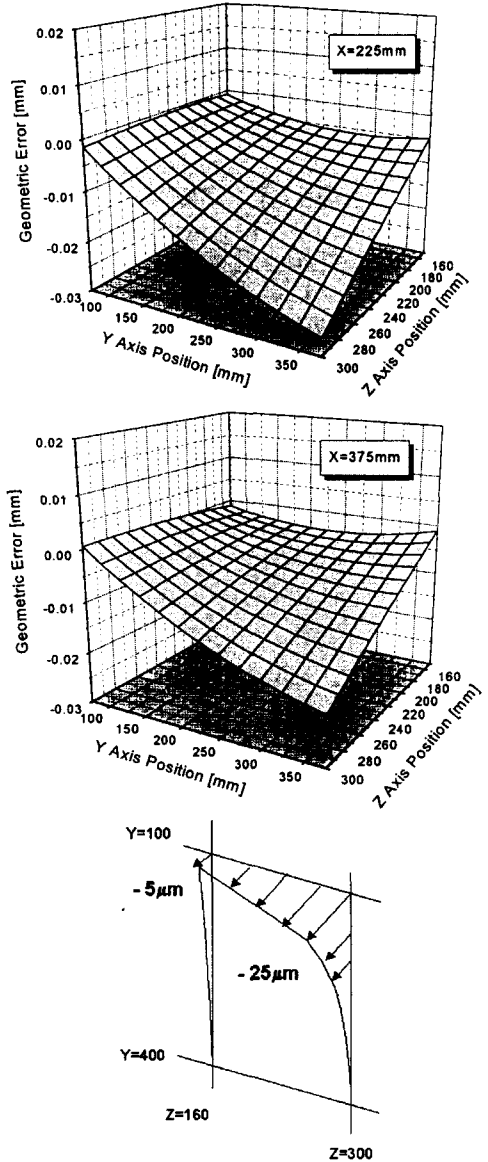


Fig.6 Measured geometric errors in X axis (YZ plane)

#### 5. 결론

본 논문에서는 기상계측 시스템을 이용하여 공작기계의 기하오차를 공작기계상에서 측정/해석하기 위해서 형상창성함수를 이용하여 기하오차



모델링을 했고, 기하오차와 열변형 오차를 측정/해석하는데 있어 핵심적인 구 측정구(SBA)를 고안하여 기상계측 시스템을 구성했다. 고안된 구 측정구는 선폽창계수가 아주 작은 슈퍼인바 (선폽창계수  $\alpha=1.2e-6$ )를 사용함으로써 주위 온도변화에 의한 영향을 최소화하도록 설계했다. 본 논문을 통해서 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 접촉식프로브와 구 측정구를 고안하여 기계상에 신속하고, 고정도로 공작기계의 기하오차를 측정할 수 있는 기상계측 시스템을 개발했고, 개발된 시스템을 이용함으로써 측정시간을 크게 단축했다.

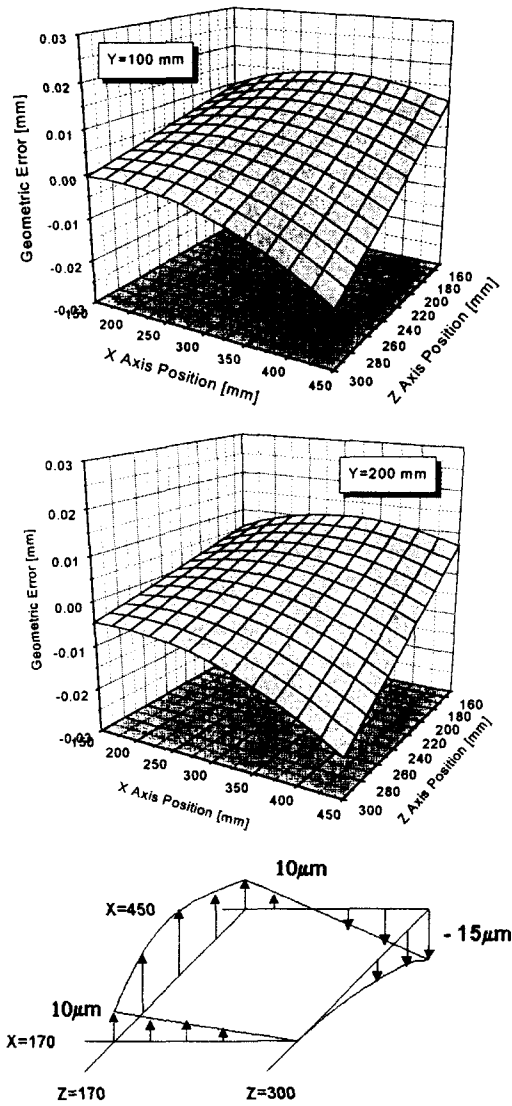


Fig.7 Measured geometric errors in Y axis (XZ plane)

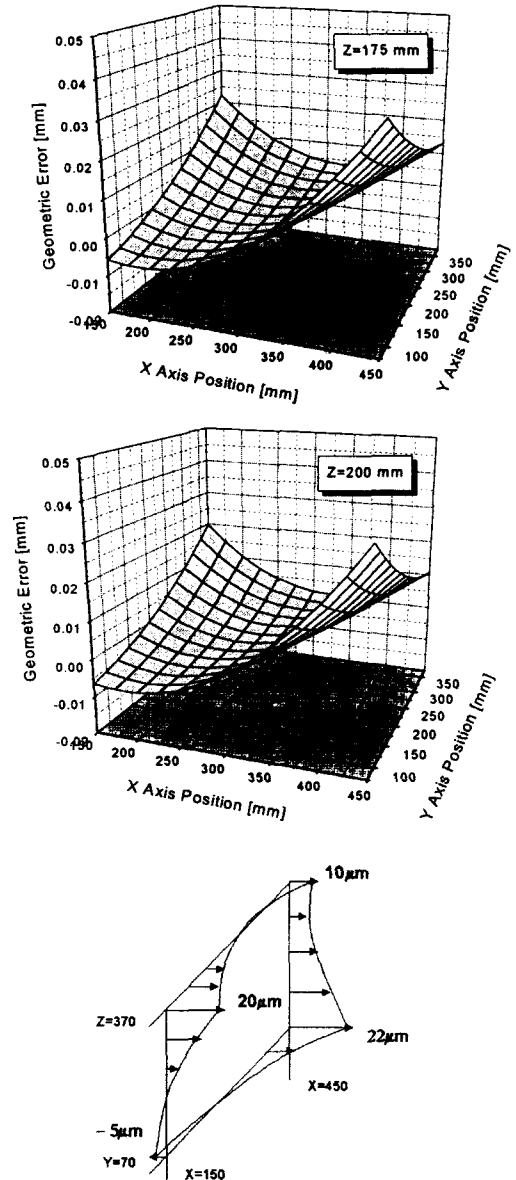


Fig.8 Measured geometric errors in Z axis (XY plane)

2) 공작기계의 운동특성을 고려하여 기하오차 모델링을 했고, 공작기계의 작업공간을 고려하여 고안된 구 측정구를 이용하여 오차모델에 포함된 파라미터를 산출함으로써 기상계측 방법으로 손쉽게 오차측정 및 해석이 가능했다.

3) 구성된 기상계측 시스템을 이용하여 구 측정구의 기준구(#1)의 중심좌표를 24회 반복측정했을 때 측정 정밀도의 표준 편차는 X, Y, Z축 방향에서 각각  $\pm 2\mu\text{m}$ ,  $\pm 2\mu\text{m}$ ,  $\pm 1\mu\text{m}$ 으로 비교적 높은 측정정도를 얻었다.

4) 기상계측 방법으로 신속한 기하오차 측정이 가능하기 때문에 공작기계 기하오차의 상태변화감시에 이용할 수 있다.

#### 참고문헌

1. S.D.Murphy, In-Process Measurement and Control, New York and Basel, Marcel Dekker, Inc., 1990.
2. Y. Kakino, et al, "Study on the Motion accuracy of NC Machine Tools, 1<sup>st</sup> Report.-The Measurement and Evaluation of Motion Errors by Double Ball Bar Test," J. of Japan. Soc. Prec. Eng., Vol.52, No.7', 1986.
3. Bryan, J.B., "A Simple Method for Testing Measuring Machine and Machine Tools, Part 1 : Principles and Applications," Precision Engineering, Vol.4, No.2, 1982.
4. Ferreira, P.M., et al, "A Method for Estimating and Compensating Quadratic Errors of Machine Tools," J. of Eng. for Industry, Vol.115, Feb. , 1993.
5. Chen J., "Computer Aided Accuracy Enhancement for Multi-axis CNC Machine Tool," Int. J. of Mach. Tools Manufacture., Vol.35, No.4, 1995.
6. 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.
7. Reshetov, D.N., et al, Accuracy of Machine Tools, New York, ASME Press, 1988.
8. Harumoto R., et al, "Error Analysis of Machine Tools using Form Shaping Function," J. of JSPE, Vol.59, No.6, 1993.