

〈論 文〉

수치제어 공작기계의 위치오차 측정 및 보정시스템 개발

이상윤* · 박준호** · 조선휘*** · 김문상*

(1992년 12월 2일 접수)

Development of an NC Machine Performance Test and Calibration System

S.Y. Lee, J.H. Park, S.W. Cho and M.S. Kim

Key Words : Circular Test(원 레적시험), Kinematic Ball Bar(기구적 볼바), Laser-Interferometer(레이저 간섭계), Volumetric Error(공간오차), Parametric Error(계수오차), Control Error(제어오차), Geometrical Error(기하학적 오차), Hysterisis(히스테리시스), Staightness(진직도), Logitudinal Error(길이방향 오차), Angular Error(각도오차), Calibration(오차보정), Compensation(보상)

Abstract

This paper presents a new NC machine performance test and calibration system. In order to measure NC machine errors in simpler, and less time-comsuming way, some indirect measuring systems such as circular disk system and double ball bar system have been developed instead of laser interferometer. But these indirect measuring systems have shown their limits in identifying each of NC machine error sources in absolute numerical value. Therefore, we developed an unique NC machine error measurement system which provides a simple measuring process like other conventional indirect methods and still can indentify each of NC machine error sources in absolute numerical value.

기 호 설 명

A_{ij} : 측정기준 j 축과 실제 j 축의 i 방향 평행도오차
 $C_x(\dot{x}), C_y(\dot{y}), C_z(\dot{z})$: x, y, z 축의 제어오차함수
 $D_{ij}(j)$: j 축의 i 방향 진직도 오차함수
 E_x, E_y, E_z : x, y, z 방향 공간오차
 H_x, H_y, H_z : x, y, z 축의 히스테리시스 오차
 O_x, O_y, O_z : x, y, z 축의 측정장치 설치시 오차
 $L_x(x), L_y(y), L_z(z)$: x, y, z 축의 길이방향 오차함수
 $P_x(x), P_y(y), P_z(z)$: x, y, z 축의 피치 오차함수

Q_{ij} : i 축에 대한 j 축의 직각도 오차
 $R_x(x), R_y(y), R_z(z)$: x, y, z 축의 롤 오차함수
 $S_{ij}(j)$: j 축의 i 방향 진직도 편차함수
 $Y_x(x), Y_y(y), Y_z(z)$: x, y, z 축의 요 오차함수

1. 서 론

수치제어 공작기계의 가공정도에 영향을 미치는 인자는 대단히 많으나 그 중에서도 지배적 영향을 미치는 것이 공작기계의 운동 정도이다. 공작기계의 운동오차는 가공오차로 나타나게 되므로 운동정도를 정확히 평가함과 아울러 그 오차 원인을 알아내는 것은 수치제어 공작기계의 가공정도를 향상시

*정회원, 한국과학기술연구원
 **정회원, 대성산업(주) 중앙연구소
 ***정회원, 서울대학교 기계설계학과

키기 위하여 매우 중요한 일이다. 과거 수치제어 공작기계의 운동정도를 측정하는 방법으로 직선절삭에 의한 치수와 형상정도 측정, 보링에 의한 위치결정정도 측정, 엔드밀을 이용한 원형 외경절삭에 의한 형상정도 측정 등의 방법들이 수치제어 공작기계의 운동정도 검사에 응용되어 왔다. 그러나 이와같은 방법은 조립 조정이 완료된 후에 실제의 가공이 어떻게 이루어지는가를 평가한다는 이점도 있으나, 이 결과에는 순수한 공작기계의 운동정도만이 아니라 공구나 공작물의 고정법 등의 영향도 합쳐서 나타나며, 가공 완료 후 3차원 측정기나 진원도 측정기 등을 필요로 하여 번거롭기도 하거니와, 측정기의 정도나 측정오차가 포함될 수도 있다. 또한 이러한 방법에 의한 측정결과는 해석법이 없어 정도저하의 원인진단에 사용할 수 없는 단점이 있다.

근래에는 계수 오차측정 및 보정방법⁽¹⁾으로 레이저 간섭계(laser-interferometer)를 이용한 측정방법이 사용되고 있으며 공간오차 측정 및 계수오차 보정방법으로 W. Knapp⁽²⁾에 의해 제안된 원 케적 시험(circular test) 등이 사용되고 있다. 원 케적 시험의 경우는 원 형상(circular profile)을 얻는 방법으로 진원판(master disc)과 LVDT(linear variable differential transducer)와 같은 선형변위 센서를 이용한 방법, 기구적 볼바(kinematic ball bar)^(3,4)를 이용한 방법 등이 현재까지 소개되었다. 이러한 측정방법에 의해 종래의 방법으로는 측정키 어려웠던 제어오차, 기하학적 오차, 열변형, 진동 등을 측정할 수 있게 되었으나, 레이저 간섭계를

이용한 측정방법의 경우 측정이 까다롭고 측정시간이 많이 소요되며 물오차의 측정이 불가능한 단점이 있고 원 케적시험의 경우 여러 오차가 중복되어 나타나는 관제로 오차의 요소별 분리에 그 한계가 있다. 따라서 수치제어 공작기계의 운동 정도에 영향을 주는 각종 오차요인의 요소별 분리를 가능케 하는 동시에 원 케적시험과 같이 측정방법을 간략화한 새로운 오차측정 및 보정방법이 요구된다.(Fig.1)

2. 새로운 오차측정 및 보정방법의 개발

2.1 오차의 종류

공작기계의 오차 요소에는 무작위 오차와 동적 오차 그리고 기하학적 오차가 있다. 무작위 오차는 같은 측정조건에서도 그 값이 일정치 않으므로 정량적인 값으로 표시되어지지 않으며 무작위 오차의 영향을 최소화하기 위하여 최소오차 자승법 등을 사용한다.

동적 오차로는 히스테리시스와 위치제어 루프 상의 오차 등이 있다. 히스테리시스는 공작기계의 구동방향에 따라 달라지는 위치오차로 각축의 +방향 운동시 위치오차 측정치에서 -방향 운동시 위치오차 측정치를 뺀 값을 1/2하여 그 크기를 구하며 위치제어 루프상의 오차는 각 축방향 구동속도와 위치제어 루프게인의 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽³⁾

$$C_i = -V_i/K_i \tag{1}$$

C_i : i 축의 위치제어 루프상의 오차

V_i : i 축방향 구동 속도

K_i : i 축의 위치제어 루프 게인

기하학적 오차에는 각 축에 따라 3개의 위치오차와 3개의 각도오차가 존재한다. 한 축만을 구동시키며 오차를 측정했을 경우 구동 축방향 위치오차를 길이방향 오차라고 진직도 오차(straightness error)와 구분하기 위하여 구동축에 직각인 두 방향의 위치오차를 진직도 편차(straightness deviation)라 명명한다. x 축을 측정 기준축으로, xy 평면을 측정 기준 평면으로 할 경우 진직도 편차와 진직도 오차, 직각도 오차와의 관계를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$S_{yx}(x) = D_{yx}(x) + A_{yx} * x$$

$$S_{zx}(x) = D_{zx}(x) + A_{zx} * x$$

$$S_{xy}(y) = D_{xy}(y) - Q_{xy} * y - A_{yx} * y$$

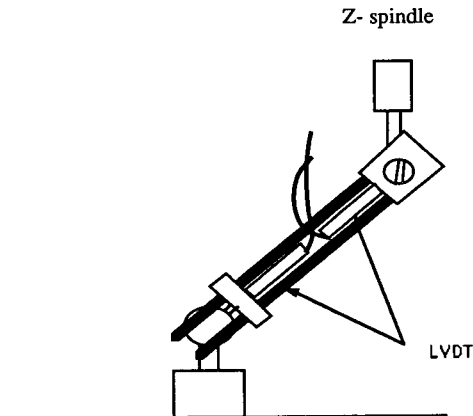


Fig. 1 Kinematic ball bar

$$\begin{aligned}
 S_{zy}(y) &= D_{zy}(y) + A_{zy} * y \\
 S_{xz}(z) &= D_{xz}(z) - Q_{xz} * z - A_{zx} * z \\
 S_{yz}(z) &= D_{yz}(z) - Q_{yz} * z - A_{zy} * z
 \end{aligned} \quad (2)$$

따라서 진직도 오차와 직각도 오차를 개별적으로 측정할 경우 식(2)를 식(3)의 진직도 편차항에 대입하여 사용한다. 한편 진직도 편차를 측정하였을 경우 진직도 오차와 직각도 오차는 진직도 편차로부터 쉽게 구해질 수 있다.⁽⁵⁾ 진직도 편차를 최소 오차 자승법을 사용하여 일차식으로 나타낸 뒤 이를 진직도 편차로부터 빼면 진직도 오차가 된다. 또한 두축의 진직도 편차를 각각 일차식으로 나타낸 뒤 두 일차식의 계수를 더하면 두 축간의 직각도 오차의 라디안 값이 된다. 각도오차로는 일반적으로 롤, 피치, 요 오차를 사용한다.⁽⁶⁾

측정장치의 설치시 측정장치의 원점과 공작기계의 원점이 일치하지 않을 경우 위치오차가 발생하게 되는데, 이를 측정장치 설치시 오차라 한다. 이는 수치제어 공작기계 자체의 오차가 아니고 측정시 생기는 추가적인 오차로써 실제 오차 보정 프로그램이 수행되기 전에 이를 구해 보상함으로써 이로 인한 영향을 배제하여야 한다.

2.2 오차식의 모델링

임의의 점(x, y, z)에서의 공작기계 공간오차는 위의 모든 오차 요소를 종합함으로써 얻어진다. 무작위 오차는 반복 측정에 의하여 그 영향을 감소시킴을 원칙으로 하며 실제 계수 인식과정에서는 최소 오차자승법에 의하여 제거되었다고 가정한다.

$$\begin{aligned}
 E_x &= [P_x(x) + R_y(y)] * z - [Y_x(x) + R_z(z)] * y \\
 &\quad + L_x(x) + S_{xy}(y) + S_{xz}(z) + O_x + H_x + C_x \\
 E_y &= -[R_x(x) + P_y(y)] * z + [Y_y(y) + R_z(z)] * x \\
 &\quad + L_y(y) + S_{yx}(x) + S_{yz}(z) + O_y + H_y + C_y \\
 E_z &= [R_x(x) + P_z(z)] * y - [R_y(y) + Y_z(z)] * x \\
 &\quad + L_z(z) + S_{zy}(y) + S_{zx}(x) + O_z + H_z + C_z \quad (3)
 \end{aligned}$$

(함수 $F(m)$ 은 $F(m) = \sum_{i=1}^m a_i * m^i$ 으로 표현되어지는 n차 다항식이라 정의한다.)

일반적으로 공작기계는 그 형태에 따라 한 축의 운동이 다른 축의 운동에 대하여 종속되어 있기도 하고 독립되어 있기도 하다. 예를 들어 Fig. 2 형태의 공작기계에서 x축 구동시 y축과 z축이 같이 움직이게 된다. 따라서 y축과 z축의 운동은 x축의 운동에 대하여 종속되어 있다. 그러나 y축 구동시 x축은 정지한 상태로 있으므로 x축의 운동은 y축

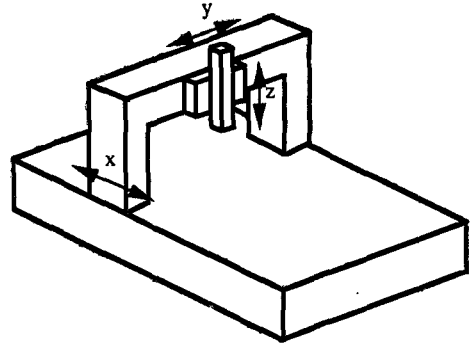


Fig. 2 An NC machine type

의 운동에 대하여 독립되어 있다.

각도오차의 경우는 한 축의 운동이 다른 축의 운동에 대하여 종속되어 있을 경우에만 공간오차에 영향을 미치게 된다. 따라서 한 공작기계의 공작 오차에 모든 각도오차 요소가 전부 나타나는 경우는 없고 각 축 운동의 다른축 운동에 대한 종속, 독립 여부에 따라 공작 기계마다 각기 다르게 나타난다. 측정장치 및 측정방법의 개발시에는 모든 공작기계의 경우를 전부 고려해야 하므로 모든 각도 오차 요소가 전부 나타난다고 가정하지만 실제로 공작기계의 오차를 측정하고 보정하는 경우 측정대상이 되는 공작기계의 형태에 따라 공간 오차에 영향을 주지 않는 각도오차를 배제함으로써 오차식을 간단하게 하고 필요없는 측정을 줄이기 된다.

예를 들어 Fig. 2 형태의 공작기계의 경우 x축의 운동은 y, z축의 운동에 대하여 독립되어 있고 y축은 z축에 대하여 독립되어 있으므로 $R_z(z) * y$, $[Y_y(y) + R_z(z)] * x$, $P_z(z) * y$, $-[R_y(y) + Y_z(z)] * x$ 항들은 모두 제거한다. 따라서 Fig. 2 형태 공작기계의 공간 오차식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 E_x &= [P_x(x) + R_y(y)] * z - Y_x(x) * y + L_x(x) \\
 &\quad + S_{xy}(y) + S_{xz}(z) + O_x + H_x + C_x \\
 E_y &= -[R_x(x) + P_y(y)] * z + L_y(y) + S_{yx}(x) \\
 &\quad + S_{yz}(z) + O_y + H_y + C_y \\
 E_z &= R_x(x) * y + L_z(z) + S_{zy}(y) + S_{zx}(x) \\
 &\quad + O_z + H_z + C_z \quad (4)
 \end{aligned}$$

3. 기존 측정방법에의 응용

3.1 레이저 간섭계의 응용

레이저 간섭계는 계수오차 측정 및 보정방법에

주로 이용되어 왔다. 그러나 레이저 간섭계는 기본적으로 방향오차를 측정하는 기구이므로 진직도 오차를 측정하거나 각도오차를 측정할 경우 부가적인 장치를 필요로 하게 되며 측정 정도도 길이방향 오차 측정에 비해 떨어진다. 따라서 최근에는 레이저 간섭계를 공간오차 측정 및 오차요소 보정방법에 응용하여 길이 방향오차 측정장치만으로 모든 오차 요소들의 정량적 분리를 하여 오차 측정에 소요되는 경비와 노력을 줄이려는 연구가 진행되고 있다.⁽⁵⁾

본 연구에서 제시한 공간오차 구성식을 레이저 간섭계를 이용한 공간오차 측정 및 오차요소 보정방법에 적용하면 총 18번의 길이방향 오차측정만으로 모든 오차요소들의 보정이 가능해진다. Fig. 3는 18번의 측정위치를 보여주고 있다.

각 측정위치에 1~18의 번호를 부여하고 각 위치에서의 길이방향으로 측정된 오차를 $E_1 \sim E_{18}$ 이라 하면 $E_1 \sim E_9$ 는 다음과 같다. 단, 히스테리시스와 제어오차는 먼저 측정하여 보상하였다고 가정한다.

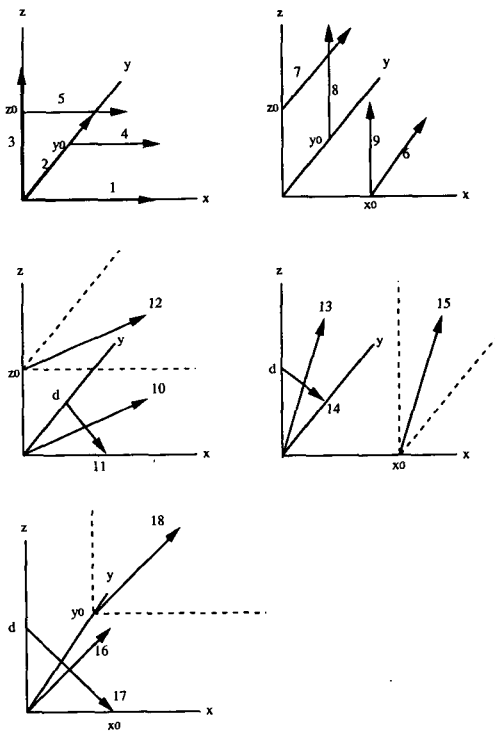


Fig. 3 Positions for the volumetric error measurement using a laser interferometer

$$\begin{aligned}
 E_1 &= L_x(x) \\
 E_2 &= L_y(y) \\
 E_3 &= L_z(z) \\
 E_4 &= -Y_x(x) * y_0 + L_x(x) + S_{xy}(y_0) \\
 E_5 &= P_x(x) * z_0 + L_x(x) + S_{xz}(z_0) \\
 E_6 &= Y_y(y) * x_0 + L_y(y) + S_{yx}(x_0) \\
 E_7 &= -P_y(y) * z_0 + L_y(y) + S_{yz}(z_0) \\
 E_8 &= P_z(z) * y_0 + L_z(z) + S_{zx}(y_0) \\
 E_9 &= -Y_z(z) * x_0 + L_z(z) + S_{zx}(x_0)
 \end{aligned} \tag{5}$$

각 축의 길이방향 오차요소는 E_1, E_2, E_3 로 부터 직접 구해진다. 또 x 축의 요 오차의 경우 E_4 에서 미리 구한 x 축 길이방향 오차를 보상해주면

$$E_4 - L_x(x) = -Y_x(x) * y_0 + S_{xy}(y_0) \tag{6}$$

x 축 요 오차요소 $-Y_x(x)$ 와 y 축의 x 방향 진직도 편차요소 $S_{xy}(y_0)$ 만 남게되는데 이 경우 진직도 편차함수는 변수가 y_0 로 고정되어 상수항으로 나타난다. 따라서 E_4 를 최소자승법을 사용하여 x 에 관한 다항식으로 표현한 뒤 상수항을 제외한 다항식의 계수들로부터 x 축의 요 오차요소 $Y_x(x)$ 를 구할 수 있다. 다른 축의 요 오차요소와 각 축의 피치 오차요소도 같은 방법으로 구해진다.

$E_{10} \sim E_{21}$ 의 경우 측정된 길이방향 오차에 한 축 이상의 오차가 포함되므로 공간오차 구성식의 변환이 필요하다. 측정시 공작기계를 각 축방향으로 각각 x, y, z 만큼 구동시켰을 때 구동거리를 L , 구동거리의 x, y, z 방향 성분을 X, Y, Z 또 측정된 길이방향 오차가 E_L 이고 E_L 의 x, y, z 방향성분이 E_x, E_y, E_z 라 할때 E_L, E_x, E_y, E_z 는 L, X, Y, Z 에 비하여 매우 작으므로 다음과 같은 식이 성립된다.

$$E_L = (X * E_x + Y * E_y + Z * E_z) / L \tag{7}$$

따라서 E_{10} 의 경우 $Z=0$ 이므로 아래와 같이 나타난다.

$$E_{10} = (X * E_x + Y * E_y) / L \tag{8}$$

여기서 E_x 와 E_y 는 식(3)으로부터 $z=0$ 을 대입하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 E_x &= -Y_x(x) * y + L_x(x) + S_{xy}(y) \\
 E_y &= Y_y(y) * x + L_y(y) + S_{yx}(x)
 \end{aligned} \tag{9}$$

각 축의 길이방향 오차요소 $L_x(x), L_y(y)$ 와 요 오차요소 $Y_x(x), Y_y(y)$ 는 $E_1 \sim E_9$ 의 측정치로 부

터 미리 구했으므로 10번 위치에서의 측정치 E_{10} 으로부터 이를 보상하여 E_{11}^* 라 하면 E_{10}^* 은 식(6)에 나타난 바와 같이 진직도 편차만의 함수가 된다.

$$E_{10}^* = (x^* S_{xy}(y) + y^* S_{yx}(x)) / L \quad (10)$$

같은 방법으로 11번위치 에서의 측정치로부터 길이 방향 오차 요소 $L_x(x)$, $L_y(y)$ 와 요오차 요소 $Y_x(x)$, $Y_y(y)$ 를 보상하여 E_{11}^* 라 하면

$$E_{11}^* = (x^* S_{xy}(y) + (y-d)^* S_{yx}(x)) / L \quad (11)$$

따라서 $E_{10}^* - E_{11}^* = d^* S_{yx}(x) / L$ 으로부터 x 축의 y 방향 진직도 편차 $S_{yx}(x)$ 를 구할 수 있고 E_{10}^* 에서 이를 보상하면 y 축의 x 방향 진직도 오차요소 $S_{xy}(y)$ 만 남게된다. 동일한 방법으로 E_{13} , E_{14} , E_{16} , E_{17} 로부터 각 축의 진직도 편차를 모두 구할 수 있다. 12번, 15번, 18번 위치에서 측정된 공간오차로부터 지금까지 구한 모든 오차요소를 보상하여 이를 E_{12}^* , E_{15}^* , E_{18}^* 라 하면 E_{12}^* , E_{15}^* , E_{18}^* 는 각각 다음과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} E_{12}^* &= (x^* z_0^* R_y(y) - y^* z_0^* R_x(x)) / L \\ E_{15}^* &= (y^* x_0^* R_z(z) - z^* x_0^* R_y(y)) / L \\ E_{18}^* &= (z^* y_0^* R_x(x) - x^* y_0^* R_z(z)) / L \end{aligned} \quad (12)$$

식(12)의 경우 각 축의 롤 오차를 정량적으로 분리해낼 수 없다. 그러나 2장에서 서술한 바와 같이 실제 동작기계에 있어서는 모든 각도 오차항이 모두 나타나는 경우는 없으므로 위치오차에 영향을 주지 못하는 각도 오차항을 제거할 수 있다. 예를 들어 Fig. 2 형태의 동작기계의 경우 식(12)의 E_{12}^* , E_{18}^* 은 다음과 같이 바꿔쓸 수 있고

$$\begin{aligned} E_{12}^* &= (x^* z_0^* R_y(y) - y^* z_0^* R_x(x)) / L \\ E_{18}^* &= (z^* y_0^* R_x(x)) / L \end{aligned} \quad (13)$$

따라서 E_{18}^* 로부터 x 축의 롤 오차요소 $R_x(x)$ 를 구한뒤 E_{12}^* 의 식에서 이를 보상하면 y 축의 롤 오차요소 $R_y(y)$ 를 구할 수 있다. Fig. 2 형태의 동작기계의 경우 식(4)에서 나타난 바와 같이 y 축의 요 오차와 z 축의 롤, 피치, 요 오차요소는 공간오차에 영향을 미치지 못한다. 따라서 6번, 8번, 9번 위치에서의 측정은 필요없으며 총 측정회수도 15번으로 줄어든다.

3.2 기구적 볼바에의 응용

기구적 볼바를 이용한 오차측정 및 보정방법은 진직도 오차요소의 측정이 불가능하고 직각도 오차

요소와 롤 오차요소의 경우도 그 오차요소가 동작기계의 지배적인 오차요소인 경우만 측정이 가능하다. 따라서 기구적 볼바를 이용한 오차 측정의 목적은 빠른 시간에 간편한 방법으로 동작기계의 지배적인 오차를 대략적으로 아는데 있다. 기존의 측정방법은^(2,4) 4번 측정 원점을 바꿔가며 총 6번의 측정으로 직각도 오차와 길이 방향오차 피치, 요 오차 그리고 각 축간 상대적인 롤 오차를 보정한다.

본 연구에서는 측정을 보다 간편하게 하여 측정 원점의 변화없이 총 3번의 측정으로 직각도 오차와 길이 방향오차 그리고 피치, 요 오차의 보정방법을 제시하였다. 기구적 볼바에 의한 측정은 축을 따라가며 오차의 변화를 보는것이 아니라 특정한 측정점에서의 오차로부터 오차요소들을 분리해 낸다. 따라서 오차요소들의 분리를 위해선 각 오차 함수들을 1차식으로 가정해야한다. 예를 들어 x 축의 피치오차 함수 $P_x(x)$ 의 경우 $P_x^* x$ 가 된다. 이 경우 공간오차 구성식은 다음과 같다(Fig.4,5).

$$\begin{aligned} E_x &= [P_x^* x + R_y^* y]^* z - [Y_x^* x + R_z^* z]^* y \\ &\quad + L_x^* x + S_{xy}^* y + S_{xz}^* z + O_x + H_x + C_x \\ E_y &= -[R_x^* x + P_y^* y]^* z + [Y_y^* y + R_z^* z]^* x \\ &\quad + L_y^* y + S_{yx}^* x + S_{yz}^* z + O_y + H_y + C_y \\ E_z &= [R_x^* x + P_z^* z]^* y - [R_y^* y + Y_z^* z]^* x \\ &\quad + L_z^* z + S_{zy}^* y + S_{zx}^* x + O_z + H_z + C_z \end{aligned} \quad (14)$$

또한 측정기의 반지름이 R 이고 중심점으로부터 측정점까지의 거리가 X, Y, Z 일 때 반경 방향오차 E_r 과 공간오차와의 관계는 다음과 같다.

$$E_r = (X^* E_x + Y^* E_y + Z^* E_z) / R \quad (15)$$

기존의 측정방법의 경우 Fig. 6, Fig. 7에서 보는 바와 같이 측정은 총 6번을 하게 된다.

1~6번 위치에서의 반경방향 오차를 각각 E_{r1}

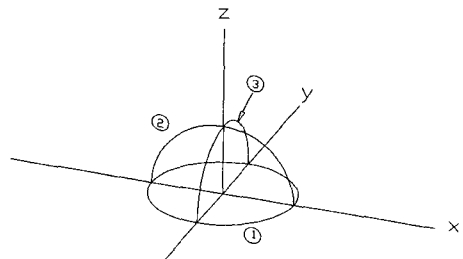


Fig. 4 Three positions for the error measurement using a kinematic ball bar

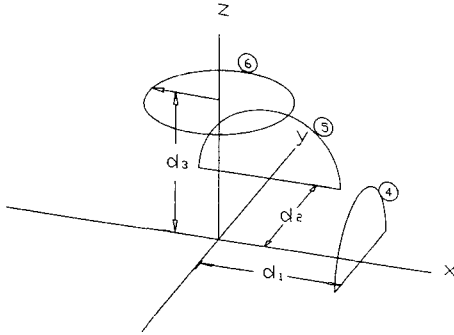


Fig. 5 Three added positions for currently used method

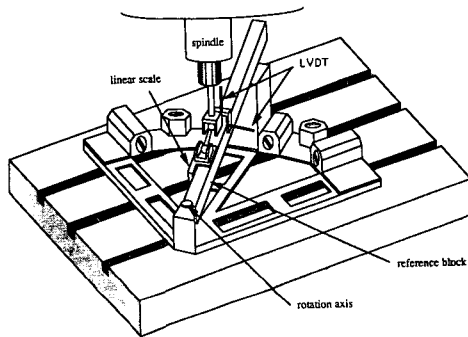


Fig. 6 The CALMAC error measurement system

~ E_{r6} 라 하면 1번 위치에서의 반경방향 오차는 다음과 같이 나타난다. 단, 제어 오차와 히스테리시스 등은 기존의 방법^(2,3,4)과 동일한 방법으로 측정하여 미리 보정한다.

$$E_{r1}(x, y) = [Y_x \cdot x^2 \cdot y + L_x \cdot x^2 + S_{xy} \cdot x \cdot y + Y_y \cdot x \cdot y^2 L_y \cdot y^2 + S_{yx} \cdot x \cdot y] / R \quad (16)$$

$x=R, y=0$ 일때, 즉 0도에서의 반경방향 오차는 $E_{r1}(R, 0) = L_x \cdot R$ 이므로 x 축 길이방향오차함수의 계수 L_x 가 계산된다. 한편 마찬가지로 $x=0, y=R$ 일 때의 반경방향 오차 $E_{r1}(0, R)$ 로부터 y 축의 길이방향 오차함수의 계수 L_y 를 구할 수 있다.

점 (x, y) 와 x 축으로 대칭인 점 $(x, -y)$ 에서의 반경방향 오차 $E_{r1}(x, -y)$ 는 다음과 같이 나타난다.

$$E_{r1}(x, -y) = [-Y_x \cdot x^2 \cdot y + L_x \cdot x^2 - S_{xy} \cdot x \cdot y^2 + Y_y \cdot x \cdot y^2 + L_y \cdot y^2 - S_{yx} \cdot x \cdot y] / R \quad (17)$$

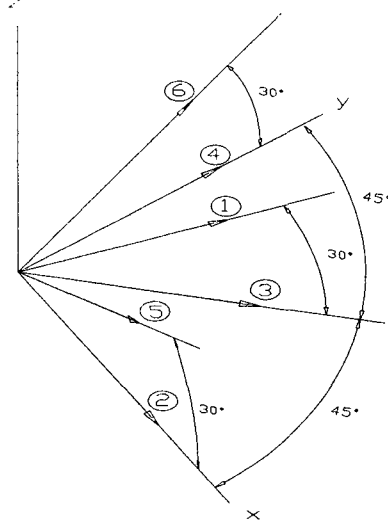


Fig. 7 Positions for error measurement using CALMAC

- 1st position : drive X, Y, Z axis simultaneously
- 2nd position : drive X axis only, ($y=z=0$)
- 3rd position : drive X, Y axis simultaneously, ($z=0$)
- 4th position : drive Y axis only, ($x=z=0$)
- 5th position : drive X, Z axis simultaneously, ($y=0$)
- 6th position : drive Y, Z axis simultaneously, ($x=0$)

따라서

$$E_{r1}(x, y) + E_{r1}(x, -y) = 2 \cdot [L_x \cdot x^2 + Y_y \cdot x \cdot y^2 + L_y \cdot y^2] / R \quad (18)$$

미리 구한 길이방향 오차함수의 계수 L_x, L_y 에 의한 오차를 보상하면 y 축의 요 오차함수의 계수 Y_y 가 얻어진다. 마찬가지로 y 축에 대칭인 두 점에서의 반경방향 오차 $E_{r1}(x, y), E_{r1}(-x, y)$ 를 더하면 x 축 요 오차가 분리된다. 요 오차 분리시 랜덤 오차의 영향을 줄이기 위해선 요 오차요소에 의한 오차가 가장 크게 나타나는 점을 측정점으로 할 필요가 있다. x 축 요 오차요소의 분리를 위해선 35도, -35도 두 점을 측정점으로 하는 것이 바람직하다. 한편 2번 위치의 경우 z 축에 대칭인 두 점을 측정점으로 하여 동일한 방법으로 y 축의 피치 오차를 구할 수 있다. 2번 위치는 반원만을 측정하므로 y 축의 대칭되는 점을 측정점으로 선택할 수 없으므로 다른 방법을 사용해야 한다. 2번 위치

의 각 측정점의 측정오차에서 y 축의 피치오차를 보상하고 그 측정점에서의 y, z 좌표값으로 나누어 주면 식은 다음과 같다.

$$E_{rz}/yz = P_z * z + S_{yz} + S_{yz} \quad (19)$$

이는 z 에 대한 1차식이므로 최소 오차자승법을 사용하여 1차항의 계수인 P_z 를 구한다. 이때 x, y 가 너무 작으면 곤란하므로 $xy > 0.2R$ 인 10도에서 80도 사이의 점들을 사용한다. 각 3번 위치에서도 동일한 방법을 사용하여 x 축의 피치오차와 z 축의 요오차를 구한다. 식(16)에서 미리 구한 길이방향 오차 함수의 계수 L_x, L_y 와 요 오차함수의 계수 Y_x, Y_y 에 의한 오차를 보상하고 나면

$$E_{r1} = [S_{xy} + S_{yx}] * x * y / R \quad (20)$$

이때 $S_{xy} + S_{yx}$ 는 전술한 바와 같이 $x-y$ 평면의 직각도 오차요소를 나타낸다. 따라서 3번까지의 위치만으로 롤 오차와 진직도 오차만을 제외한 모든 오차요소를 분리할 수 있다. 기존의 측정방법과 비교해 보면 기존의 방법은 측정 원점이 4번 바뀌므로 4번의 측정장치 설치가 필요한 반면 본 연구에서 제시한 방법은 측정 원점이 고정되어 한번의 설치로 모든 측정을 끝낼 수 있고 따라서 측정시 소요되는 시간과 노력도 1/4로 줄일 수 있다. 단, 기존의 측정방법은 롤 오차의 각 축간 상대오차를 분리해낼 수 있는데 반해 본 측정방법은 그렇지 못하다. 그러나 기존의 측정방법에서도 각 축의 롤 오차의 절대치를 알기 위해선 각도오차 측정용 기기를 사용하여 따로 측정한다. 따라서 정확한 보정이 필요없는 간략화된 오차측정 및 보정방법으로 본 연구에서 제시한 3번의 측정에 의한 보정방법을 사용할 수 있다. 또 기존의 측정방법에선 직각도 오차를 구하기 위하여 45도에서의 반경방향 오차를 사용하는데, 이 경우 반경방향 오차에는 길이방향 오차요소와 요 오차요소 등이 같이 섞여 있어서 순수한 직각도 오차로 보긴 어렵다. 그러나 본 연구에서 제시한 오차 구성식을 사용하여 다른 오차 요소들을 보정할 경우 순수한 직각도 오차의 분리가 가능하다.

4. 새로운 개념의 오차측정 장치의 개발

레이저 간섭계의 한 측정방법은 측정 정밀도가 높은 반면 측정이 까다롭고 측정시간이 오래 걸리

며 오차요소 측정법으로 측정할 경우 롤 오차의 측정이 곤란하다. 한편 기구적 불비의 경우 측정이 간편하다는 장점이 있으나 기본적으로 두점 측정이므로 오차요소들이 각 축을 따라가며 어떻게 변화하는지 알기 어렵고 측정점을 잘못 선택할 경우 실제 오차와는 동떨어진 결과가 나올 수 있으며 또한 진직도 오차를 측정할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 위의 두 가지 방법의 단점들을 보완하기 위한 방법으로서 공작기계 운동오차의 요소별 분리가 용이한 직선을 측정 기준 형상으로, 공작기계의 각축의 오차가 지배적으로 나타나는 측정위치에서 직선형상의 3차원적 오차를 측정하므로써 공작기계의 기하학적 오차 및 동작 오차의 절대적 값들을 분리해내는 새로운 오차보정 알고리즘 및 측정장치를 개발하였다. 공작기계의 직선 구동시 기준 직선에의 3차원적 오차를 측정하기 위하여 Fig. 6과 같이 측정의 기준이 되어 직각 육면체의 측정기준 형상에 운동방향 오차를 측정키 위한 리니어 스케일(linear scale)과 운동방향의 수직한 평면 상에 두개의 접촉식 변위센서인 선형 가변차동 트랜스포머(LVDT)를 위치시켰다. 리니어 스케일과 차동 트랜스포머의 분해능은 각각 $0.5 \mu\text{m}$ 와 $0.2 \mu\text{m}$ 이다. 측정 시스템의 자체정도는 $\pm 1 \mu\text{m}$ 이고 측정범위는 x, y 축으로 220 mm, z 축으로 110 mm이다.

공작기계 주축이 측정기 센서 장착부를 물고 직선 경로를 운동하면 장착된 센서들은 기준 형상에 대한 3차원적 직선운동 경로오차를 측정한다. 즉 공작기계가 직선 경로를 따라 한번 움직일 때 세 가지 방향 성분의 직선운동 오차를 측정할 수 있다. 특히 측정 시스템의 설치 위치에 따라 특정 구동축은 물론 동시 구동되는 축의 제어오차와 히스테리시스 같은 동적오차들을 손쉽게 구해낼 수 있다. 공간오차(3)으로부터 오차 요인을 분리하기 위하여 Fig. 7에서와 같이 기준 형상의 각도를 회전축을 중심으로 6번 변화시켜가며 측정하게 된다.

5. 수치제어 공작기계의 운동 오차측정 및 보정

본 연구에서 개발된 측정 시스템(CAL MAC)을 이용 측정된 오차량으로부터 수치제어 공작기계의 각종 오차요인들을 역으로 도출해내는 알고리즘은 오차 측정치로부터 장치설치 및 동적오차의 요인을 우선 분리한 후 순수한 기하학적 오차요인을 구해

내는 두 단계로 이루어진다.

5.1 장치설비 및 동적오차의 분리

장치 설치시 오차는 공작기계의 좌표 값과 x축과 y축을 독립적으로 구동할 시 얻어지는 직선경로들을 이용 측정기 상의 기준점의 위치 값을 찾아 소프트웨어적으로 직선 경로 오차 측정시에 보상하여 준다.

제어 루프상의 오차는 공작기계의 좌표 값과 x축과 y축을 독립적으로 구동할 시 얻어지는 직선 경로들을 이용 측정기 상의 기준점의 위치 값을 찾아 소프트웨어적으로 직선 경로 오차 측정시에 보상하여 준다.

제어 루프상의 오차는 구동 속도만의 함수이다. 따라서 같은 조건하에서 구동 속도만을 다르게 하여 위치오차를 두번 측정하 뒤 그 측정값의 차이를 구하면 제어 루프상의 오차가 된다. 속도 V_1 일 때의 구동 축방향 위치 오차를 E_1 이라 하고 속도 V_2 일 때의 구동 축 방향위치 오차를 E_2 라 하면 위치 제어 루프게인 K 는 다음 식과 같다.

$$K = (V_2 - V_1) / (E_1 - E_2) \tag{21}$$

히스테리시스 오차는 전술한 바와 같이 구동 방향을 달리한 두번의 위치 오차 측정으로부터 구하여진다.

5.2 기하학적 오차의 분리

제어 루프상의 오차의 히스테리시스 오차를 분리해 내고나면 기하학적 오차만 남게 된다. 기하학적 오차 요인을 모두 분리해 내기 위해선 여섯 번의 서로 다른 측정위치 변화가 필요하다. 편의상 각각의 측정위치에 번호를 붙이면 Fig. 7과 같다.

이 때 x축과 y축의 길이 방향 오차와 진직도 편차는 측정기로부터 직접적으로 구할 수 있으나 z축의 길이방향 오차와 진직도 편차 그리고 각 축의 각도 오차를 구하기 위해선 여러 위치에서의 측정결과를 연립하여 계산하는 간접적인 방법을 따라야 한다. z축의 길이방향 오차 $L_z(z)$ 와 진직도 편차 $S_{xz}(z)$, $S_{yz}(z)$ 를 구하기 위해서는 Fig. 7의 1, 3, 4, 5, 6번 위치에서의 위치 오차 측정치들을 연립하여 식(22)와 같이 구해낼 수 있다.

$$\begin{aligned} S_{xz}(z) &= E_{3x} + E_{5x} + E_{6x} - E_{1x} - 2(E_{2x} + E_{4x}) \\ S_{yz}(z) &= E_{3y} + E_{5y} + E_{6y} - E_{1y} - 2(E_{2y} + E_{4y}) \\ L_z(z) &= E_{3z} + E_{5z} + E_{6z} - E_{1z} - 2(E_{2z} + E_{4z}) \end{aligned} \tag{22}$$

세 축의 길이 방향오차와 진직도 편차를 구하고 나면 Fig. 7의 3, 5, 6번 위치에서의 오차는 각도 오차만 남게 되므로 이 위치에서의 공간 오차식들로부터 다음의 식(23), (24), (25)와 같이 구하여진다.

Table 1 Simulation result

		Input error	Output value
Hysteresis (μm)	X	12.0	11.8
	Y	14.0	14.0
	Z	16.0	16.0
System gain	X	10.0	10.0
	Y	10.0	10.0
	Z	10.0	10.1
Longitudinal error (μm)	X	84.0	84.592
	Y	-104.0	-103.01
	Z	52.0	46.672
Straightness deviation(μm)	XY	52.0	52.614
	XZ	-74.0	-72.35
	YX	144.0	143.598
	YZ	52.0	51.364
	ZX	48.0	49.106
	ZY	-30.0	-28.972
Pitch error (rad)	X	0.0032	0.00314
	Y	-0.0055	-0.00559
	Z	0.0014	0.00152
Yaw error (rad)	X	0.0014	0.00114
	Y	0.0034	0.00347
	Z	-0.0021	-0.00231
Roll error (rad)	XY	0.0045	0.00450
	YZ	-0.0080	-0.00804
	ZY	0.0035	0.00371

Feed rate 1 : 100 (mm/sec)

Feed rate 2 : 500 (mm/sec)

Measuring range : 200 (mm)

NC machine repeatability + measurement system accuracy : $\pm 1 \mu\text{m}$

$$\begin{aligned} P_x(x) &= (E_{5x} - L_x(x) - S_{xz}(z))/z \\ P_y(x) &= -(E_{6y} - L_y(y) - S_{yz}(z))/z \\ P_z(z) &= (E_{6z} - S_{zy}(y) - L_z(z))/y \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} Y_x(x) &= -(E_{3x} - L_x(x) - S_{xy}(y))/y \\ Y_y(y) &= -(E_{3y} - S_{yx}(x) - L_y(y))/x \\ Y_z(z) &= -(E_{5x} - S_{zx}(x) - S_{zy}(y))/x \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} (R_x(x)/x - R_y(y)/y) &= -(E_{3z} - S_{zx}(x) - S_{zy}(y))/xy \\ (R_y(y)/y - R_z(z)/z) &= -(E_{6x} - S_{xy}(y) - S_{xz}(z))/yz \\ (R_z(z)/z - R_x(x)/x) &= -(E_{5y} - S_{yx}(x) - S_{yz}(z))/xz \end{aligned} \quad (25)$$

5.3 오차 보정방법의 시뮬레이션

측정된 위치오차로부터 오차요인을 분리해 내는 알고리즘의 타당성을 검토하기 위하여 모든 오차요인을 전부 가지고 있는 '가상의 수치제어 공작기

계'를 설정하고 이를 측정대상으로 하는 시뮬레이션을 통하여 본 알고리즘을 적용시켜 보았다. 시뮬레이션의 환경조건과 결과는 다음과 같다.

Fig. 8, Fig. 9의 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이 최소 오차자승법을 사용하는 알고리즘의 특성으로 공작기계의 반복운동 정밀도와 측정 시스템의 정밀도의 합(±1 μm)에 상당하는 오차보정능력을 보여준다.

6. 결 론

본 연구에서는 기존의 측정장치와 측정방법에 공통적으로 적용시킬 수 있는 공간 오차식을 제시하였고 또 이를 레이저 간섭계를 이용한 공간오차 측정방법과 기구적 볼바에 적용하여 기존의 측정방법을 개선하였다.

또한 본 연구에서 제시한 공간 오차식을 사용하여 기존의 측정장치들의 보완한 새로운 측정 시스템과 측정방법을 개발하였다. 기존의 상용화된 공작기계의 운동정도 평가 시스템들의 경우 오차 측정을 위한 설치 작업이 번거로운데 반해 본 연구에서 제시한 시스템은 한번의 설치작업으로 모든 오차 요소들의 측정을 가능케 하였으며 새로 개발된 오차 측정방법과 보정 알고리즘은 모든 오차요소들의 정량적 분리를 가능케 하였고 시뮬레이션 결과 대상 공작기계의 반복운동 정밀도와 측정 시스템의 정밀도의 합(±1 μm)에 상당하는 오차보정 능력을 보여주었다.

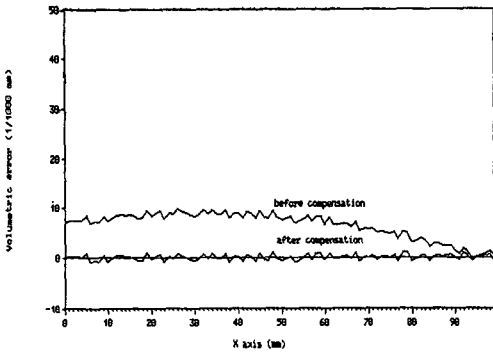


Fig. 8 Comparison between volumetric error of X axis before and after compensation

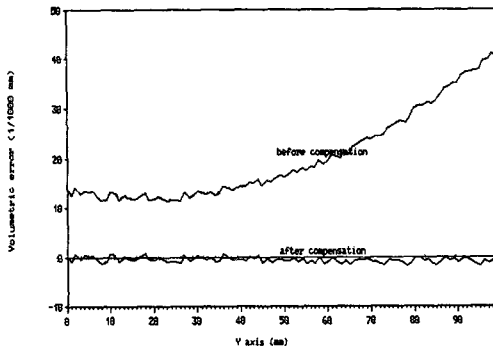


Fig. 9 Comparison between volumetric error of V axis before and after compensation

참고문헌

- (1) Duffie, N. A. and Yang, S. M. 1985, "Generation of Parametric Kinematic Error-Correction Functions from Volumetric Error Measurements," Annals of the CIRP, Vol. 34, No. 1, pp. 435~438.
- (2) Knapp, W. 1983, "Test of Three-Dimensional Uncertainty of Machine Tools and Measuring Machines and its Relation to Machine Errors," Annals of CIRP Vol. 32, No. 1, pp. 459~464.
- (3) Kakino, Y. and Nakatsu, Y. 1987, "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, Vol. 36, No. 1, pp. 377~380.
- (4) 박준호, 1992, "NC 공작기계 킨투어 운동 정도의 해석," 대학기계학회지, Vol. 32, No. 5, pp. 441~455.
- (5) Zhang, G., Ouyang, R. and Lu, B. 1988, "A Displacement Method for Machine Geometry Calibration," Annals of the CIRP, Vol. 37, No. 1, pp. 515~518.
- (6) Domez, M. A., Blomquist, D. S., Hocken, R. J., Liu, C. R. and Barash, M. M. 1986, "A Gneral Methodology for Machine Tool Accuracy Enhancement by Error COmpensation," Precision Engineering, Vol. 8, No. 4, pp. 187~211.