論文 한국정밀공학회지 제14권 제11호 (1997년 11월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 14. No. 11. November. 1997.

수평 머시닝 센터의 준 정적 오차의 실시간 보정

양 승 한*

Real Time Compensation for Quasistatic Errors of a Horizantal Machining Center

Seung-Han Yang*

ABSTRACT

A real time error compensation system was developed to improve the quasistatic volumetric accuracy of a machining center by using sensing, metrolcgy, modeling, and computer control techniques. Including thermal errors, 32 error components are formulated in the time-space domain. Fifteen thermal sensors are used to characterize the temperature field of the machine. A compensation controller based on the IBM/PC has been linked with a CNC controller to compensate for machine errors in real time. The maximum linear displacement error in 4 body diagonals were reduced from 140 ㎛ to 34.5 ㎛ with this compensation system, and the spindle thermal drift in space was reduced from 147.3 ㎛ to 16.8 ㎛.

Key Words: quasistatic volumetric error (준 정적 체적 오차), real time compensation (실시간 보정), machine accuracy (기계의 정확도), linear displacement error (선형 변위 오차), spindle thermal drift (스핀들 열변형)

1. 서 론

가공시 공작물(workpiece) 오차의 주요 원인인 공작 기계의 오차를 제거하는 것이 매우 중요하다. 공작 기계 오차의 원인중 주 원인은 준 정적 오차(기하학적 오차와 열변형 오차)에 기인한다[Bryan (1990), Ferreira et al. (1993)]. 공작 기계의 기하학적 오차는 기계 자체의 불완전한 제조, 기계요소들의 부정렬, 정적 변형 또는 기계 마모로 인해서 생긴다. 열변형 오차는 모터, 베어링, 유압 시스템, 주위 온도로 인한 기계요소들의 열적 뒤틀림으로부터 온다. 이들 오차를 디자인과 제조기술 등을 통한 공작기계자체의 구조향상으로 극복할 수가 있으나 많은 경우에 있어서, 단순히 생산기술과 디자인기술로 극복할 수 없는 물리적인 한계가 있다. 그래서, 오차 보정 시스템은 기계의 정도를 효율적인 비용으로 향상시키는 수단으로 최근의 중요한 관심사로 대두되고 있다.

초기의 오차 보정 연구는 단지 한 두개의 기하학적 오차 혹은 열변형 오차의 조사에 집중이 되었다[Leete (1961), Love (1973), McClure (1967)]. 밀링 머신의 스핀들 열변형 오차를 보정하기 위해서 선형가변모델

* 경북대학교 기계공학부

[Okushima et al. (1975)], 지수함수모델[Janeczko (1988)]과 같은 경험적인 모델링 접근 방법이 사용되었다. 경험적인 모델링 접근외에도 유한요소해석법(FEM) 등이 기계의 열변형 오차를 추정하는데 사용되었다. 그러나 유한요소해석모델에서 열변형 오차들에 대한 추정은 정확한 경계조건과 열원 정보획득의 어려움때문에 일반적으로 신뢰성이 떨어진다. Bryan[1990]은 유한요소해석적인 모델접근방법은 공작기계 열변형 오차의 20%정도만을 추정할 수 있다고 보고하였다.

Schultschik[1977]은 3차원 기계의 체적 오차를 벡터로 표현하는 수학적인 방법을 공식화하였으며 Zhang [1985]는 3차원측정기(coordinate measurement machine)에 수학적 체적 오차모델을 적용하였다. Donnez[1986]는 공작기계의 정확도를 높이기 위한 오차보정의 일반적인 방법론을 제안하고 열영향들을 고려하여 선반에 구체화시켰다. 최근에 Chen[1993]은 공작 기계 구조의 비강체 효과를 고려하였다.

이 논문에서는 3축 머시닝센터(Cincinnati Milacron Γ-10)의 준 정적 체적오차모델의 유일한 형태가 제안되었다. 이론적으로 이 3축머시닝센터에는 32개의 준 정적 오차요소가 있다. 이들 32개의 준 정적 오차요소중 14개의 준 정적 오차요소가 마지막 오차보정시스템에 포함되었으며, 모델은 다른 좌표계의 원점들 사이의 오프셋에 대한 명확한 표현을 하고 있다. 모델에서 여러 개의 좌표계들을 사용하는 것은 레이저 광학계(HP5528)와 같은 측정시스템의 정렬에 대한 편리함과 기계구조에 따른 위치 결정에 있어 유연성을 부여한다. 오차 보정 제어는 소프트웨어적 방법에 기반을 두었으며 이 보정 시스템의 성능을 평가하기 위해 ANSI/ASME B5.54[1] 기준에 따른 일련의 테스트를 하였다.

2. 준 정적 체적 오차 합성 모델

기계구조를 조사함으로써, 일반적인 21개 기하학적 오차외에도 머시닝센터의 열영향에 의한 11개의 오차를 추가할 수가 있다. 모델의 추가된 열변형 오차의 첫번째 그룹은 공구 팁의 열변형이다. Fig. 1에서 점선은 냉조건하에서의 기계이고, 실선은 열변형된 기계로 가정한다. 이론적으로 열영향은 공구 팁에서 여섯 개의 오차(세 개의 병진오차와 세 개의 회전오차)를 발생시키나, 스핀들축의 회전오차는 공구 팁 위치에 아무런 영향을 주지 않는다. 그래서 오직 다섯 개의 오차를 고려했다. 추가된 열변형 오차의 두 번째 그룹은 기계축의 원점에서의 열변형으로부터 생기며 각각의 원점은 기계구조의 열변형에 의해 점진적으로 P_c에서 P_w까지 이동한다. 3차원 기계에서 모두 9개의 원점 이동 오차가 추가되어지나, 이 숫자는 한 축이 다른 2축에 대한 기준으로 선택이 될수 있다면 6개로 줄어든다.

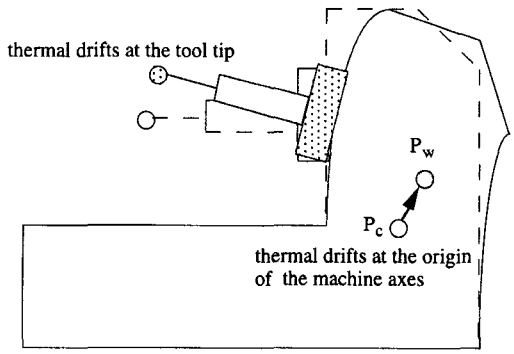

Fig. 1 Additional thermal errors in the volumetric model

모든 오차 성분을 합성한 준 정적 체적 오차 합성모델(quasistatic volumetric error synthesis model)은 등변환 행렬(homogeneous coordinate transformation matrix)로 유도된다. 그러므로, Fig. 2가 보여주는 것처럼 좌표계를 움직이는 각 슬라이드에 지정한다. 베드위의 좌표계 A를 기준좌표계로 간주한다. 테이블 좌표계 B는 Z축 슬라이드에, 좌표계 C는 X축 슬라이드에, 그리고 좌표계 D는 스핀들 캐리어에 고정하였다.

체적 오차 합성모델을 유도하는 일반적인 과정은 다음과 같다. 첫째, 공구팁의 좌표계를 국부좌표계로 수식화하고, 등변환 행렬을 이용하여 좌표계 A로 변환하였다. 그 다음, 공작물의 절삭될 점의 좌표를 국부좌표계로 표현하고, 역시 등변환 행렬으로 좌표계 A로 변환하였다. 절삭될 공작물의 점과 공구팁은 같은 위치이기 때문에, 두 부분을 같게함으로서 행렬 방정식으로 수식화시킬 수 있다. 마지막으로 준 정적 체적 오차 합성모델을 획득하기 위해서 행렬 방정식을 풀 수 있다.

이 연구에서 사용된 수평머시닝센터의 경우, 공구팁의 점을 먼저 스핀들 캐리어 좌표계 D로 표현하고, X축 슬

1) This Standard is requirements and methods for performance evaluation of CNC machining centers.

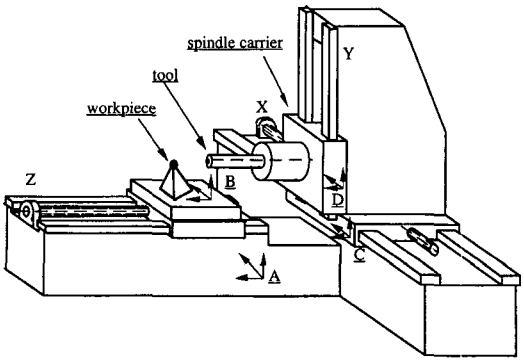

Fig. 2 The coordinate systems on the machining center

라이드 좌표계 C로 변환한 다음, 최종적으로 좌표계 A로 변환하였다.

$$\overrightarrow{T_A}(t) = \tau_A^C \ \tau_C^D \overrightarrow{T_D}(t) \tag{1}$$

여기서,

$\overrightarrow{T_D}(t)$:스핀들 캐리어 좌표계 D에서 공구팁의 벡터,
τ_C^D :스핀들 캐리어 좌표계 D에서 슬라이드 좌표계 C로의 변환 행렬,
τ_A^C :슬라이드 좌표계 C에서 좌표계 A로의 변환 행렬,
$\overrightarrow{T_A}(t)$:좌표계 A에서 공구팁의 벡터이다.

유사한 방법으로, 공작물의 절삭점을 Z축 슬라이드 좌표계 B로, 다시 식(2)와 같이 좌표계 A로 변형한다. 다음 방정식에는 오차 벡터가 포함되어 있다.

$$(\overrightarrow{W} + \Delta\overrightarrow{W})_A = \tau_A^B (\overrightarrow{W} + \Delta\overrightarrow{W})_B \tag{2}$$

여기서,

$(\overrightarrow{W} + \Delta\overrightarrow{W})_B$: Z축 좌표계 B에서, 공작물의 이상 차원 벡터 $\overrightarrow{W_B}$와 오차 벡터 $\Delta\overrightarrow{W_B}$,
τ_A^B : 슬라이드 Z축 좌표계 B에서 좌표계 A로의 변환 행렬,
$(\overrightarrow{W} + \Delta\overrightarrow{W})_A$: 좌표계 A에서, 공작물의 이상 차원 벡터 $\overrightarrow{W_A}$와 오차 벡터 $\Delta\overrightarrow{W_A}$이다.

두 벡터 $\overrightarrow{T_A}(t)$와 $(\overrightarrow{W} + \Delta\overrightarrow{W})_A$를 같게 둠으로써 다음의 행렬 방정식을 얻을 수가 있다.

$$\tau_A^C \tau_C^D \overrightarrow{T_D}(t) = \tau_A^B (\overrightarrow{W} + \Delta\overrightarrow{W})_B \tag{3}$$

결과적으로 공작물 오차 벡터 $\Delta\overrightarrow{W_B}$는 식(3)을 이용해서 풀 수가 있다.

유도를 간단하게 하기위해서, 기준좌표계의 원점(O_A)을 X축 좌표계의 원점(O_X)과 같은 위치에 둔다. 식(3)의 각 항을 다음과 같은 오차성분을 포함한 행렬 형태로 쓸 수가 있다. 이상적 공작물의 차원에 있어, Z축 슬라이드 시스템 B에서 공작물 좌표계를 식(3)으로부터 다음과 같이 풀 수가 있다:

$$\overrightarrow{W_B} = \begin{bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_x + Oxy_x + Ozx_x + x \\ T_y + Oxy_y + Ozx_y + y \\ T_z + L + Oxy_z + Ozx_z - z \\ 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$\overrightarrow{T_D}(t) = \begin{bmatrix} T_x + \Delta S_x + \varepsilon_{\beta s} \ L \\ T_y + \Delta S_y - \varepsilon_{\alpha s} \ L \\ T_z + \Delta S_z + L \\ 1 \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$\tau_A^C = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{\gamma x}(t) & \varepsilon_{\beta x}(t) & Ozx_x + \Delta zx_x(t) + \delta_{xx}(t) + x \\ \varepsilon_{\gamma x}(t) & 1 & -\varepsilon_{\alpha x}(t) & Ozy_y + \Delta zx_y(t) + \delta_{yx}(t) \\ -\varepsilon_{\beta x}(t) & \varepsilon_{\alpha x}(t) & 1 & Ozx_z + \Delta zx_z(t) + \delta_{zx}(t) - S_{zx}(t)x \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\tau_C^D = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{\gamma y}(t) & \varepsilon_{\beta y}(t) & Oxy_x + \Delta xy_x(t) + \delta_{xy}(t) - S_{xy}(t)y \\ \varepsilon_{\gamma y}(t) & 1 & -\varepsilon_{\alpha y}(t) & Oxy_y + \Delta xy_y(t) + \delta_{yy}(t) + y \\ -\varepsilon_{\beta y}(t) & \varepsilon_{\alpha y}(t) & 1 & Oxy_z + \Delta xy_z(t) + \delta_{zy}(t) - S_{zy}(t)y \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$\tau_A^B = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{\gamma z}(t) & \varepsilon_{\beta z}(t) & \delta_{xz}(t) \\ \varepsilon_{\beta z}(t) & 1 & -\varepsilon_{\alpha z}(t) & \delta_{yz}(t) \\ -\varepsilon_{\beta z}(t) & \varepsilon_{\alpha z}(t) & 1 & \delta_{zz}(t) + z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{8}$$

여기서,

W_x, W_y, W_z: Z축 슬라이드 시스템 B에서 공작물 좌표

T_x, T_y, T_z : 스핀들 캐리어 좌표계 D에서 표준 공구팁의 좌표,

L : 공구 교환시, 공구 오프셋 길이,

x : X축 좌표계에서 새들의 이동거리,

y : Y축 좌표계에서 스핀들 캐리어의 이동거리,

z : Z축 좌표계에서 크로스 슬라이드의 이동거리,

Oxy_x, Oxy_y, Oxy_z: X축 원점 O_x에 대한 Y축 원점 O_y의 세 방향거리,

Ozx_x, Ozx_y, Ozx_z: Z축 원점 O_z에 대한 X축 원점 O_x의 세 방향거리,

$\delta_{xx}, \delta_{yy}, \delta_{zz}$: X, Y, Z축 방향의 선형 변위 오차,

$\delta_{yx}, \delta_{zx}, \delta_{xy}, \delta_{zy}, \delta_{xz}, \delta_{yz}$: 진직도 오차 (δ는 병진오차를 나타낸다); 첫 아래 첨자는 오차 방향을 표시한다; 다음 아래 첨자는 슬라이드의 움직이는 방향을 표시한다,

$\varepsilon_{yx}, \varepsilon_{zx}, \varepsilon_{xy}, \varepsilon_{zy}, \varepsilon_{xz}, \varepsilon_{yz}$: 각도 오차 ($\varepsilon$는 회전오차를 나타낸다);첫 아래 첨자는 오차 축방향을 표시한다;다음 아래 첨자는 슬라이드의 움직이는 방향을 표시한다,

S_{xy}, S_{yz}, S_{zx} : 두 축 사이의 직각 오차,

$\Delta S_x, \Delta S_y, \Delta S_z$: 표준 공구 팁에서 x, y, z축 방향으로 스핀들 드리프트,

$\varepsilon_{xs}, \varepsilon_{ys}$: x, y축 방향의 스핀들 틸트,

$\Delta zx_x, \Delta zx_y, \Delta zx_z$: O_z에 대한 원점 O_x의 x, y, z 세 방향으로 원점 열변형,

$\Delta xy_x, \Delta xy_y, \Delta xy_z$: O_x에 대한 원점 O_y의 x, y, z 세 방향으로 원점 열변형이다.

2차 이상의 오차항들을 무시하면, 공작물의 체적오차를 식(4)에서 식(8)을 이용해서 식(3)으로부터 풀 수가 있다.

$$\begin{aligned}\Delta W_x(t) &= \Delta zx_x(t)+\Delta xy_x(t)+\Delta S_x(t)+\delta_{xx}(t)+\delta_{xy}(t)-\delta_{xz}(t)\\ &+L\ \varepsilon_{\beta s}(t)+(T_z+L+Oxy_z)\ \varepsilon_{\beta x}(t)+(T_z+L)\ \varepsilon_{\beta y}(t)\\ &-(T_z+L+Ozx_z+Oxy_z-z)\ \varepsilon_{\beta z}(t)-(T_y+Oxy_y+y)\varepsilon_{\gamma x}(t)\\ &+T_y\varepsilon_{\gamma y}(t)+(T_y+Oxy_y+y+Ozx_y)\ \varepsilon_{\gamma z}(t)-y\ S_{xy}(t)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta W_y(t) &= \Delta zx_y(t)+\Delta xy_y(t)+\Delta S_y(t)+\delta_{yx}(t)+\delta_{yy}(t)-\delta_{yz}(t)\\ &-L\ \varepsilon_{\alpha s}(t)-(T_z+L+Oxy_z)\ \varepsilon_{\alpha x}(t)-(T_z+L)\ \varepsilon_{\alpha y}(t)\\ &+(T_z+L+Oxy_z+Ozx_z-z)\ \varepsilon_{\alpha z}(t)+(T_x+Oxy_x)\varepsilon_{\alpha y}(t)\\ &+T_x\varepsilon_{\gamma y}(t)-(T_x+Oxy_x+x+Ozx_x)\ \varepsilon_{\gamma z}(t)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta W_z(t) &= \Delta zx_z(t)+\Delta xy_z(t)+\Delta S_z(t)+\delta_{zy}(t)+\delta_{zx}(t)-\delta_{zz}(t)\\ &+(T_y+Oxy_y+y)\ \varepsilon_{\alpha x}(t)+T_y\varepsilon_{\alpha y}(t)-(T_y+y+Oxy_y\\ &+Ozx_y)\ \varepsilon_{\alpha z}(t)-(T_x+Oxy_x)\ \varepsilon_{\beta x}(t)-T_x\varepsilon_{\beta y}(t)+(T_y\\ &+Oxy_x+x+Ozx_x)\ \varepsilon_{\beta z}(t)-xS_{zx}(t)-yS_{zy}(t)\end{aligned} \quad (9)$$

3. 오차 성분의 모델링

직접적으로 준 정적 오차를 확인하는 것 대신, 기계의 온도 영역과 준 정적 오차를 연관시키는 경험적인 모델을 만들었다. 기계 온도 영역을 온 라인 모니터링함으로써 준 정적 오차를 모델로부터 예측할 수 있다. 초기에 15개의 열 센서를 Fig. 3과 같이 기계에 설치하였다. 센서 T1와 T2는 x축의 너트와 베어링의 온도를 읽고, 센서 T3와 T4는 y축의 너트와 베어링, 센서 T5와 T6는 z축의 너트와 베어링, 센서 T7와 T8는 스핀들, 센서 T9, T10, T11, T12는 칼럼, 센서 T13와 T14 는 각각 x축과 z축 베드의 온도, 센서 T15는 주변 온도를 검출한다.

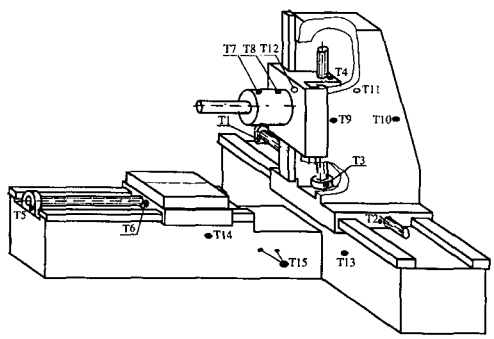

Fig. 3 The sensor locations of the thermal sensing system

이 머시닝센터의 열적 거동을 조사하기 위해서 다음과 같은 조건으로 기계를 테스트하였다. 첫째, 기계를 작동하기 전에 온도 영역을 측정하였다. 그리고 나서 6시간동안 600 rpm의 스핀들속도로 y축을 저속(508 mm/min)으로 움직인 다음, 온도 영역을 다시 기록하였다. 기계를 멈추고 냉각을 시킨 다음, 5시간동안 3000

rpm의 스핀들속도로 y축을 고속(2006 mm/min)으로 움직였다. Fig. 4는 이러한 작업조건하에서 온도 영역을 보여주고 있다. 스핀들의 온도 상승이 저속에서는 약 9 ℃, 고속에서는 22℃이었다. 칼럼 앞면의 온도(T9, T12)는 칼럼 뒷면의 온도(T10, T11)보다 조금 더 높았다. y축 너트의 온도가 저속에서 7℃정도 올라갔고, 고속에서는 10℃정도 올라갔다. 이것은 리드스크루에서 큰 팽창이 있는 것을 말하고 y축에 큰 선형 변위 오차가 발생될 수 있음을 의미한다. x축과 z축에서는 가등중 온도 변화가 적으므로, y축과 스핀들의 움직임이 x축과 z축에 영향을 주지않는다는 결론을 지었다. 다른 나머지 12개의 센서들만으로 분석에 충분하였으므로 최종 모델에서는 T1, T3, T5 센서를 사용하지 않았다.

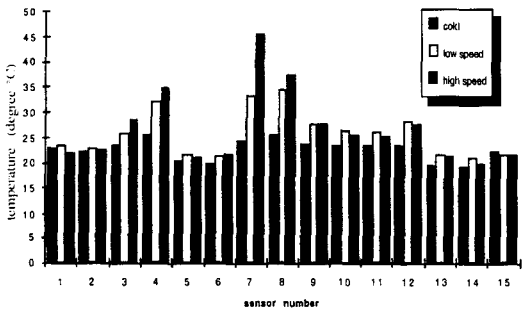

Fig. 4 The temperature field under different working conditions

32개의 준 정적 오차요소는 위치독립적인 오차요소와 위치종속적인 오차요소의 2가지 형태로 나눌 수 있다.

위치독립적인 오차요소모델링에서는 세 그룹의 위치독립적인 오차요소(직각도 오차, 원점 이동 오차, 스핀들 이동 오차)가 있다. 이들 각각의 오차는 기계의 온도에 대해서 영향받는 값들이다. 다중회귀분석 (multiple regression analysis)이 위치독립적인 오차요소들을 모델링하는데 사용된다. 모델의 일반적 형태는 다음과 같다.

$$\delta = a_0 + \sum_{i=1}^{n} b_i \ \Delta T_i + \sum_{i=1}^{n} \cdots \sum_{j=1}^{i} c_{ij} \ \Delta T_i \ \Delta T_j + \ldots \quad (10)$$

여기서,

δ : 준 정적 오차,

a_0, b_i, c_{ij} : 회귀 모델의 계수,

ΔT_i, ΔT_j : 온도 변수의 차이다.

위치종속적인 오차요소모델링에서는 각 축 3개의 병진오차와 3개의 회전오차를 포함하여 18개의 위치종속적인 오차요소가 있다. 위치종속적인 오차요소의 모델링은 보통 위치독립적인 오차요소의 모델링보다 더 복잡하다. 왜냐 하면 위치종속적인 오차요소들은 온도와 위치의 함수이기 때문이다. 다행히 두가지 타입의 변수는 대부분 분리될 수 있다. Fig. 5에서 x축의 선형 변위 오차를 고려해보자. 오차들의 윤곽은 다른 온도 영역하에서도 그다지 크게 변하지 않고 곡선의 기울기만 변한다. 따라서, 이런 종류의 오차는 다음 두 개의 부분으로 나눌수가 있다. 다른 온도 영역하에서도 변화하지 않는 이들 오차요소의 경우, 오직 기하학적 오차만이 모델에 포함되어 있다.

$$E(p, T) = E_g(p) + E_t(p, T) \quad (11)$$

여기서,

$E(p, T)$: 위치에 의존하는 오차,

$E_g(p)$: 위치만의 함수인 $E(p, T)$의 기하학적인 부분,

$E_t(p, T)$: 위치와 온도 영역의 함수인 $E(p, T)$의 열적인 부분이다.

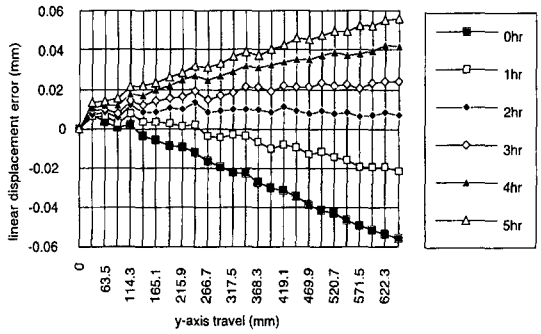

Fig. 5 The linear displacement errors of the y axis : δ_{yx}

4. 보정 제어 시스템

보정 제어 시스템은 머시닝센터에 있는 CNC 제어기와 IBM/PC을 합용하는 방법으로 개발되었다. 이 보정 제어 시스템은 다음과 같은 기능들을 실행한다:

• 실시간에 모든 열센서들로부터 온도정보를 읽는다.

• 인코더(encoder)로부터 슬라이드의 현재 위치를 읽는다.

• 수학적 모델들을 사용하여 모든 준 정적 오차를 계산한다.

• 준 정적 체적 오차 합성모델을 이용하여 세 방향으로 체적 오차를 계산하다.

• 실시간에 체적 오차 보정을 실행하기 위해서 CNC 제어기에 체적 오차 신호를 보낸다.

준 정적 체적 오차 보정 제어시스템의 기본원리가 Fig. 6에 그려져있다. 기계를 CNC 제어기에 저장된 가공하지 않고 가동에 필요한 파트 프로그램(part program)에 따라 작동한다. 레이저 측정 시스템과 전하 센서을 이용하여 오프 라인으로 먼저 측정된 준 정적 오차 모델의 파라메타가 IBM/PC 마이크로컴퓨터의 데이터 베이스에 저장된다. 온도센서들에 의해서 머시닝센터의 온도 영역을 직접적으로 측정하고 그 데이타를 A/D 보드를 통해서 컴퓨터에 전달한다. 슬라이드의 위치는 인코더의 신호에 의해서 결정되고 Q/D 보드를 이용해서 컴퓨터에 전달된다. 온도 영역, 슬라이드 위치, 그리고 수학적 모델에 기초를 둔 모든 준 정적 오차요소를 각각 계산할 수가 있다. 그리하여 준 정적 체적 오차 합성모델을 이용해서, 공구 팁과 공작물간의 준 정적 오차를 세 방향으로 결정할 수 있다. 3축에서 나온 보정신호를 CNC 제어기에 보낸다. CNC 제어기는 보정신호들을 읽고 실행하기 위해서 x, y, z축의 원점들을 이동시킨다.

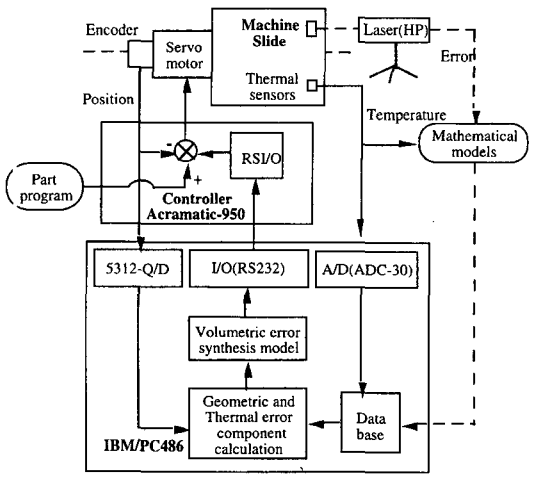

Fig. 6 The quasistatic volumetric error compensation control system

5. 보정 제어 시스템의 성능 평가

오차 보정 시스템의 성능을 평가하기 위해 두 가지 종류의 실험을 하였다. 첫째, 18개의 위치종속적인 오차요소들과 3개 직각도에 영향을 받는 체적 오차를 측정하기 위해서 레이저 측정 시스템을 이용한 체(體) 대각선 변위 측정을 수행하였다. 둘째, 전하 센서 시스템을 이용한 원점이동오차를 측정하였다.

5.1 체(體) 대각선 변위정도

ANSI/ASME B5.54표준에 따른 체(體) 대각선 변위에 의해 준 정적 오차 보정을 평가하였다. Fig. 7에서 보다시피 체 대각선에 따른 선형 변위 오차를 측정하기 위해서 광학장치를 셋업하였다. 총 네 개의 체 대각선들이 있으며 그들 각각의 선형변형에 대한 정확도는 웜업과 냉조건하에서 측정되었다. Table 1은 실험에 사용된 측정장치의 명세들이다.

Table 1 Measuring equipment list

	Equipment	Specification
machining center	Cincinnati Milacron T-10	2.0μm repeatability
laser measurement system	HP 5528A	0.1μm resolution
capacitance system	Lion Precision System	0.1μm resolution

5.1.1 측정 조건

1) 기계 이동

a. 대각선 #1: 93.5mm 간격으로 (-381.0, 139.7, 127.0)mm에서 (381.0, 657.9, 767.1)mm까지.

b. 대각선 #2: 93.5mm 간격으로 (-381.0, 657.9, 127.0)mm에서 (381.0, 139.7, 767.1)mm까지.

c. 대각선 #3: 93.5mm 간격으로 (381.0, 139.7, 127.0)mm에서 (-381.0, 657.9, 767.1)mm까지.

d. 대각선 #4: 93.5mm 간격으로 (381.0, 657.9, 127.0)mm에서 (-381.0, 139.7, 767.1)mm까지.

2) 이송속도: 1905 mm/min.

3) 측정점의 수 : 13, 한방향.

4) 휴지 시간 : 각 점마다 6초.

5) 웜업 조건: 3000rpm의 속도와 2006mm/min의 이송속도로 (-406.4, 0.0, 127.0) mm에서 (406.4, 660.4, 787.4) mm까지 두 시간 반동안 기계를 가동했음.

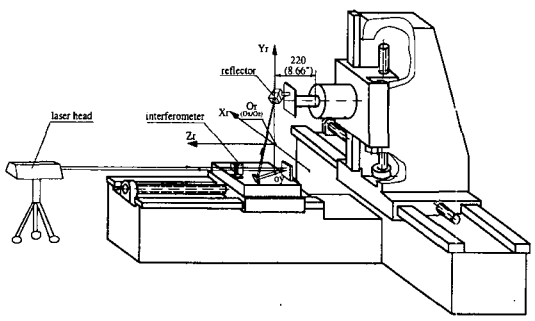

Fig. 7 The experimental setup for the body diagonal measurements

위에서 기술한 바와 같이, 레이저 대각선 변위 측정을 모두 네 개의 체(體) 대각선에 대해 시행하였다. 그 결과들은 다음에 요약된다.

5.1.2 평가 결과

Fig. 8는 보정 시스템을 사용할 때와 사용하지 않을 때, 그리고 냉 조건과 웜업 조건에서 체(體) 대각선 #1에 따른 선형 변위 오차를 보여주고 있다. 다른 세 개의 체(體) 대각선에 따른 선형 변위 오차도 유사한 방법으로 실행되었다. 성능 측정 결과들은 Table 2에 요약되었다. 네 개의 체(體) 대각선에서 최대 선형 변위 오차는 보정 시스템에 의해서 -140㎛에서 -34.5㎛로 감소되었다. 위의 측정조건하에서 체적 오차는 네 배 이상 줄어들었다.

Table 2 Summary of the performance evaluation using body diagonal measurements

Error (μm)	Diagonal Displacement Error (μm)			
Condition	W/O(Without) Compensation		With Compensation	
	Cold	Warm	Cold	Warm
Diag #1	-105	-19.2	12.7	-7.7
Diag #2	-65.7	12.9	14.7	15.6
Diag #3	-140	-71.4	-34.5	-55.4
Diag #4	-103.6	-32.8	14.1	15.7

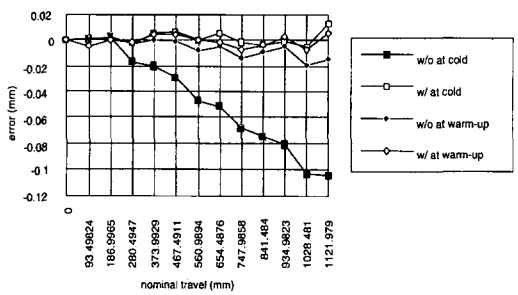

Fig. 8 Linear displacement error of diagonal #1

5.2 스핀들과 원점이동

스핀들-원점 이동 오차는 전하 센서 시스템에 의해서 확인되었다. 그 과정은 다음과 같이 기술된다:

- 기계가 냉 상태일 때 한 세트의 데이타를 기록하였다.
- 그리고 기계는 한 개의 체 대각선을 따라 600 rpm의 스핀들 속도와 508 mm/min의 이송속도로 한 시간 반 동안 가동되었고 한 세트의 데이타를 30분 간격으로 기록하였다.
- 한 시간동안 기계를 멈추었고, 기계가 냉 상태가 되었을 때 다시 30분 간격으로 한 세트의 데이타를 기록하였다.
- 기계를 3000 rpm의 스핀들 속도와 2006 mm/min의 이송속도로 두 시간동안 가동시킨 후 한 개의 체(體) 대각선을 따라 한 세트의 데이타를 30분 간격으로 기록하였다.
- 그 뒤 기계를 한 시간동안 정지시킨 후 30분 간격으로 한 세트의 데이타를 기록하였다.

Fig. 9,10,11은 다음 위치(x=0.0mm, y=139.7mm, z=127.0mm)에서 x, y, z 세 방향으로 측정된 오차를 보여준다. 보정 시스템을 사용하지 않을 때, x방향에서의 오차는 1시간동안 저속운전을 한후 27.9㎛에 도달하고 2시간동안 고속운전을 한 후에는 91.4㎛까지 증가하였다. 이 x축방향에서의 오차는 보정 시스템에 의해서 약 13.7㎛, y축방향에서의 오차는 -14㎛에서 5.6㎛, z축방향에서의 원점 이동 오차는 114.3㎛에서 -7.7㎛로 감소하였다. 동시에 x, y, z축방향으로의 오차를 표현하기 위해서는 식(15)와 같이 오차 벡터 개념을 이용한다.

$$e_v = \sqrt{e_x^2 + e_y^2 + e_z^2} \tag{15}$$

여기서

e_v : 원점이동의 오차 벡터,

e_x : x방향에서의 원점 이동 오차,
e_y : y방향에서의 원점 이동 오차,
e_z : z방향에서의 원점 이동 오차이다.

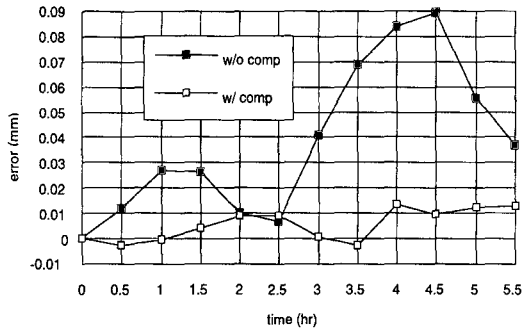

Fig. 9 The compensation results of the origin shift error along the x direction

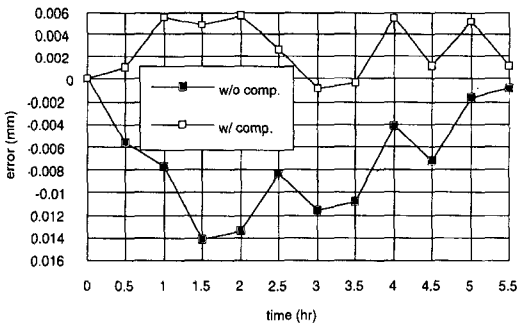

Fig 10 The compensation results of the origin shift error along the y direction

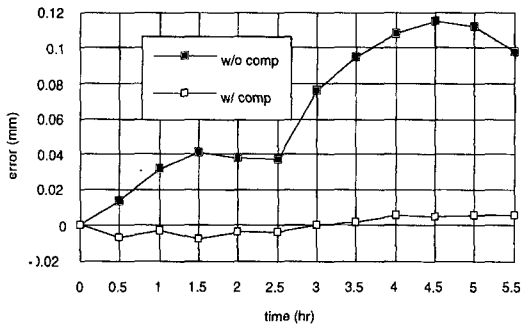

Fig. 11 The compensation results of the origin shift error along the z direction

식(15)에서 모든 파라메타를 대입시키면, 보정 시스템을 미 사용시 오차는 147.3㎛, 사용시 오차는 16.8㎛이다. 그래서 이 보정 시스템은 원점 이동 오차를 8.7배만큼 줄였다.

6. 결 론

(1) 이 기계의 모든 준 정적 오차요소를 합성시키는 데 체적 오차 모델을 사용했다. 32개 준 정적 오차중 각축 3개의 선형 변위 오차와 스핀들에서의 11개 열 이동 오차를 포함한 14개를 열변형 오차로 취급하였다. 이들 14개의 열변형 오차에서 오직 9개만이 머시닝센터에 크게 영향을 미친다.

(2) 머시닝센터의 열변형 오차는 실시간에 미리계산된 경험적인 모델들에 의해서 측정이 된다. 처음에는 15개의 열센서가 기계구조의 온도 영역을 파악하기 위해서 사용되었으나, 결국, 12개 열센서만이 이 기계의 열거동을 특성화하기 위해 적절하다고 결정되었다. 다른 시상수를 가지고 있는 기계구조들의 열특성은 공학적인 판단들과 점진적인 다중회귀분석을 사용해서 모델링하였다.

(3) 실시간에 체적 오차를 보정하기 위해서, 소위 "원점 이동"의 소프트 웨어적 방법을 머시닝센터에 성공적으로 실행하였다. 이 보정방법은 정확성과 비용에 있어 효율적이다.

(4) 이 보정 시스템의 효과를 증명하게 하기위해서, 체적성능을 ANSI/ASME B5.54표준에 따라 대각선 변위를 측정하였다. 그 결과, 정확도가 네 배이상으로 향상되었음을 보여준다. 네 개의 체(體) 대각선에서 최대 선형 변위 오차는 이 보정 시스템을 사용함으로써 140㎛에서 34.5㎛로 감소되었다. 추가적으로 스핀들-원점 이동 오차는 147.3㎛에서 16.8㎛로 감소되었다.

참고문헌

1. J. B. Bryan, "International Status of Thermal Error Research(1990)", Annals of CIRP, Vol. 39, No. 2, pp. 645-656, 1990.
2. J. S. Chen, J. Yuan, J. Ni, and S. M. Wu, "Real Time Compensation of Time-variant Volumetric Error on a Machining Center", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 114, pp. 472-479, 1993.

3. M. A. Donmez, D. Blomquist, R. Hocken, C. R. Liu, and M. M. Barash, "A General Methodology for Machine Tool Accuracy Enhancement by Error Compensation", Precision Engineering, Vol. 8, No. 4, pp. 187-196, 1986.
4. P. M. Ferreira, and C. R. Liu, "A Contribution to the Analysis and Compensation of the Geometric Error of a Machining Center", Annals of CIRP, Vol. 35, No. 1, 1986.
5. J. Janeczko, "Machine Tool Thermal Distortion Compensation", Proceedings of 4th Biennial International Machine Tool Technology Conference, 1988.
6. D. J. Leete, "Automatic Compensation of Alignment Errors in Machine Tools", International Journal of Machine Tool Design and Research, Vol. 1, pp. 293-324, 1961.
7. W. J. Love, and A. J. Scarr, "Determination of the Volumetric Accuracy of Multi-Axis Machines", Proceedings of the 14th MTDR Conference, Vol. 14, pp. 307-315, 1973.
8. E. R. McClure, "Significance of Thermal Effect in Manufacturing and Metrology", Annals of CIRP, Vol. 15, pp. 61-66, 1967.
9. K. Okushima, and Y. Kakino, "Compensation of Thermal Displacement by Coordinate System Correction", Annals of CIRP, Vol. 24, No. 1, pp. 327-331.
10. R. Schultschik, "The Components of the Volumetric Accuracy", Annals of CIRP, Vol. 25, No. 1, pp. 223-227, 1977.
11. G. Zhang, C. Wang, X. Hu, and F. Jing, "Error Compensation of Coordinate Measuring Machines", Annals of CIRP, Vol. 34, No. 1, pp. 445-448, 1985.