

공작기계 원점 열변형오차의 모델링 및 보상제어

안 중 용*, 정 성 종**

Modeling and Compensatory Control of Thermal Error for the Machine Origin of Machine Tools

Joong-Yong Ahn*, Sung-Chong Chung**

Abstract

In order to control thermal deformation of the machine origin of machine tools, a empirical model and a compensation system have been developed. Prior to empirical modeling, the volumetric error considering shape errors and joint errors of slides is formulated through the homogeneous transformation matrix (HTM) and kinematic chain. Simulation results of the HTM method show that the thermal error of the machine origin is more critical than position-dependent errors. In order to make a stable and effective software error compensation system, the GMDH (Group Method of Data Handling) models are constructed to estimate the thermal deformation of the machine origin by measuring deformation data and temperature data. A test bar and gap sensors are used to measure the deformation data. In order to compensate the estimated error, the work origin shift method is developed by implementing a digital I/O interface board between a CNC controller and an IBM PC. The method shifts the work origin as much as the amounts, which are calculated by the pre-established thermal error model. The experiment results for a vertical machining center show that the thermal deformation of the machine origin is reduced within $\pm 5\mu m$.

Key Words : Gap Sensor(갭 센서), GMDH Model(GMDH 모델), HTM (동차변환행렬), Temperature Measurement(온도 측정), Test Bar(테스트 바), Thermal Deformation(열변형), Work Origin Shift Method(공작물 원점 이동법)

1. 서론

절삭공정에서는 여러 가지 오차요인들에 의하여 가공정밀도가 영향을 받게 된다. 가공정도를 저하시키는 주요원인에는 공작기계의 기하학적 오차와 열변형 오차 등이 있다. 그중 열변형의 영향은 40~70%로서 고정도 가공을 위해서는 열변형 오차를 줄이는 것이 중요한 문제로 인식되고 있다.⁽¹⁾

열변형 오차를 줄이는 해결책은 공작기계의 설계 개선과 오차보상 기술로 나눌 수 있다. 설계 개선에 의한 방법은 많은 시간과 비용을 필요로 하기 때문에, 최근에는 열변형 모델에 의한 공작기계 오차보상에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다.⁽²⁾

오차보상은 열변형 예측과 보상제어로 이루어진다. 먼저, 열변형 예측은 해석적 방법과 경험적 모델에 의한 방법으로 나눌 수 있다. 유한요소법과 유한차분법에 의한 해석적

* 한양대학교 대학원 기계설계학과

** 한양대학교 기계공학부

방법⁽¹⁾은 기계 경계 조건 및 여러 절삭조건하에서 변화하는 열발생율에 대한 충분한 정보를 제공하지 못하기 때문에 정확성을 보장할 수 없고, 해석에 걸리는 시간 때문에 실시간 오차보상에 적용하는 것은 불가능하다. 따라서 실시간 오차보상에는 계산 시간이 짧은 경험적인 모델이 이용된다. 경험적인 열오차 모델은 비선형적인 열오차의 특성을 잘 표현해야 할 뿐 아니라 서로 다른 절삭조건에 대해서 예측 성능이 안정되어 있어야 한다. Moriwaki⁽³⁾는 온도측정치에 기초하여 신경회로망 모델을 구성하여 열변형 예측을 시도하여 비선형적인 모델의 자동 생성을 시도하였으나, 다른 절삭조건에 대한 비교평가가 이루어지지 않았다. Blomquist⁽⁴⁾는 온도에 관해서는 1차, 위치에 관해서는 2차의 열변형 모델을 가정하여 열변형 특성이 온도에 대해 비선형적인 것을 고려하지 못했다. 정성종 등은 GMDH(group method of data handling)를 이용하여 입력변수와 비선형 모델 생성의 자동화를 구현하고 다른 절삭 조건에 대한 높은 예측성능을 확인하였으며,⁽⁵⁾ 실험을 통해 전체 열변형량 중에서 원점의 이동이 차지하는 비율이 상당히 큼을 밝힌 바 있다.⁽⁶⁾

열오차 보상은 주로 PC를 이용하여, 열오차 모델을 통해 온라인으로 계산된 보상값을 실시간으로 공작기계에 적용하는 방법으로 구현되어져 왔다. 보상신호의 실시간 적용은 실시간 NC 명령 수정, 기계 서보루프의 위치 피드백 신호에 아날로그 전압을 삽입하는 아날로그 보상, 그리고 디지털 I/O 통신 포트를 이용하여 CNC 제어기에 디지털 값을 전송하여 기계 서보루프의 구동 신호를 수정하는 디지털 보상 등이 있다. 그러나 NC 명령 수정 기법은 이송 명령의 양끝점만 보상이 되고 고속가공의 실현에 장애가 된다. 또한 아날로그 및 디지털 보상작업은 적용할 수 없는 공작기계가 많고 구현하기가 어려우며 기계의 피드백 신호와 충돌하지 않도록 세심한 주의가 필요하다.⁽⁷⁾

본 연구에서는 공작기계 구조의 기구학적 해석에 근거하여 기하학적 오차와 열오차를 포함하는 오차 변환행렬을 구성하여 3차원 열오차 맵을 구성하였다. 시뮬레이션을 통하여 원점 열변형의 중요성을 확인하고 GMDH 알고리즘을 이용하여 기계 각부의 온도측정치에 기초한 원점 열변형 예측 모델을 생성하였다. 이 과정에서 학습데이터를 위한 원점 열변형량 측정에는 갠센서를 이용한 측정장치를 개발하여 측정의 편이성과 모델 갠신의 용이성을 도모하였다. 그리고 열변형 오차보상제어를 위해서, 생성

된 열변형 예측 모델과 컴퓨터와 CNC간의 인터페이스 보드 및 디지털 I/O를 이용하여 공작물 원점 이동법(work origin shift method)을 구현하였다. 수직형 머시닝센터를 대상으로 주축의 무부하 회전상태에서 열적거동 예측과 보상을 시도함으로써 제안된 열변형 예측 모델의 정확도와 오차보상법을 검증하였다.

2. 열변형 예측 모델

2.1 HTM을 이용한 열변형 예측 모델

공작기계에서 발생하는 기하학적 오차는 공작기계의 테이블, 새들, 컬럼 및 주축 등과 같이 기구의 링크에 해당하는 형상부분에서 발생하는 형상오차와 공작기계 조인트 부에서 발생하는 조인트오차로 나뉜다. 형상오차는 공작물 장착시 가공물의 하중, 공작기계 제작시 요소들의 치수결함, 공작기계에서 발생하는 열로 인한 각각의 요소들의 열변형, 주위 온도 변화로 인하여 발생하고, 조인트오차는 각각의 이송축에서의 볼스크류의 백래쉬, 안내면과 슬라이드의 평행도 및 진직도오차로 발생하게 된다.

Fig. 1과 같은 형상요소에 대하여 거리변환을 나타내는 위치벡터에 의해 좌표계 1과 2사이의 이상적인 동차변환행렬은 식 (1)과 같이 주어진다.

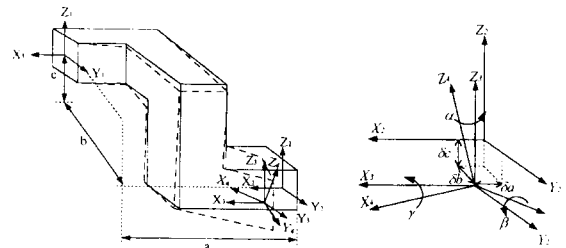


Fig. 1 Shape error in a solid link

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, a, b, c = 좌표계 1과 2 사이의 X, Y, Z 축 방향의 거리

그러나, 실제의 형상요소에서는 X, Y, Z 축 방향으로 각각 $\delta a(t), \delta b(t), \delta c(t)$ 만큼의 병진변형오차와 각 변형오차 $\gamma^s(t), \beta^s(t), \alpha^s(t)$ 가 발생하며 이는 준정적 오차로 시간 또는 온도에 관한 함수로 표현할 수 있다. 여기서 각 변형오차량 $\gamma^s(t), \beta^s(t), \alpha^s(t)$ 가 미소하게 발생한다고 가정하면, 이상적인 위치에 대한 실제 형상요소의 최종적인 동차변환행렬은 좌표계 1과 4사이의 병진 및 회전 변환행렬의 순차적인 곱에 의해서 식 (2)와 같이 주어진다.

$${}^1T_4^{actual} = \begin{pmatrix} 1 & -\alpha^s(t) & \beta^s(t) & a + \delta a(t) \\ \alpha^s(t) & 1 & -\gamma^s(t) & b + \delta b(t) \\ -\beta^s(t) & \gamma^s(t) & 1 & c + \delta c(t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Fig. 2와 같이 하나의 이송체가 안내면을 따라 직선 운동하는 조인트의 경우, 실제 이송경로는 이상적인 이송 경로를 벗어나게 되고 위치오차, 각오차, 그리고 수평 및 수직방향 진직도오차가 발생한다. 이러한 조인트오차의 요소들은 기준 좌표의 위치와 시간 및 온도의 함수로 표현된다. 형상오차와 마찬가지로 각오차 성분이 작다고 가정하면, X 축 이송 조인트오차의 동차변환행렬은 식 (3)과 같다.

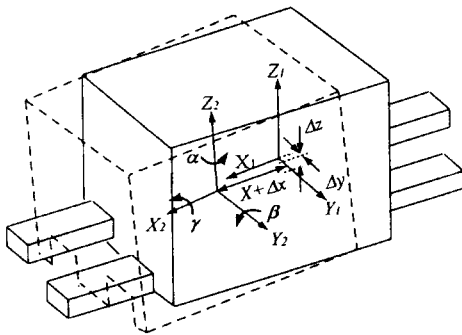


Fig. 2 Joint error in a sliding joint

$${}^1\phi_2 = \begin{pmatrix} 1 & -\alpha(x, t) & \beta(x, t) & x + \delta_{xx}(x, t) \\ \alpha(x, t) & 1 & -\gamma(x, t) & \delta_{yx}(x, t) \\ -\beta(x, t) & \gamma(x, t) & 1 & \delta_{zx}(x, t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

여기서, $\delta_{xx}(x, t) = X$ 축 방향의 위치오차,

$\delta_{yx}(x, t) = X$ 축 이송시 수평진직도 오차

$\delta_{zx}(x, t) = X$ 축 이송시 수직진직도 오차

Fig. 3은 본 논문의 실험 대상인 3개의 이송축을 갖는 수직형 머시닝 센터를 나타낸다. 앞에서 유도한 동차변환행렬을 사용하여 절삭점의 위치를 표현하는 위치벡터를 구하기 위하여 Table 1과 같이 8개의 좌표축을 정의하였다. Fig. 4는 Table 1에서 정의된 좌표계를 이용한 기구학적 연결기구를 보인 것이다. 이러한 좌표계 사이에 존재하는 오차들의 동차변환행렬들은 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 구할 수 있다.

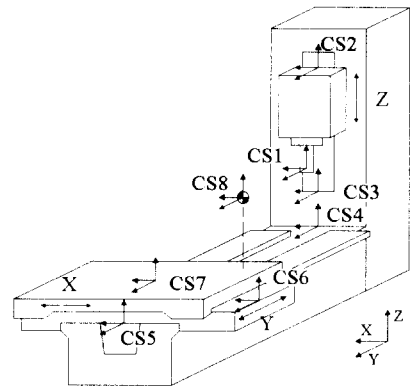


Fig. 3 Coordinate System of Vertical Machining Center

Table 1 Origins of Coordinate System

Number	Location
CS ₁	Tool Grasp Point
CS ₂	Ball Screw Nut Center of Head
CS ₃	Rear Bearing Center of Z-axis Ball Screw End
CS ₄	Front Bearing Center of Y-axis Ball Screw End
CS ₅	Nut Center of Ball Screw of Saddle
CS ₆	Rear Bearing Center of End of X-axis Ball Screw
CS ₇	Nut Center of Ball Screw of Table
CS ₈	Workpiece Origin

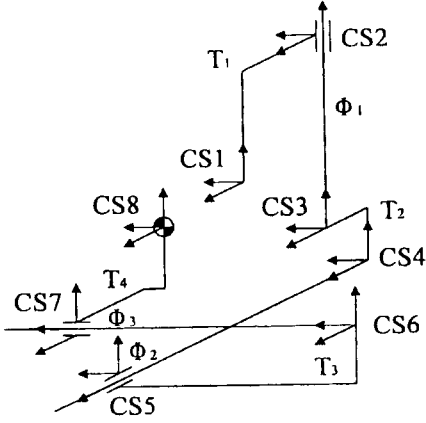


Fig. 4 Kinematic chains for Vertical Machining Center

스핀들 좌표계 (CS₁) 내에서의 공구상의 절삭점 {r_s}과 공작물 좌표계 (CS₈)에서 공작물상의 절삭점 {r_w}이 일치하면 오차가 없는 이상적인 경우의 절삭점 {r_s}_{ideal}과 오차가 있는 경우의 절삭점 {r_s}_{actual}은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\{r_s\}_{ideal} = \{[{}^1T_2][{}^2\phi_3][{}^3T_4][{}^4\phi_5][{}^5T_6][{}^6\phi_7][{}^7T_8]\}_{ideal} \{r_w\} \quad (4)$$

$$\{r_s\}_{actual} = \{[{}^1T_2][{}^2\phi_3][{}^3T_4][{}^4\phi_5][{}^5T_6][{}^6\phi_7][{}^7T_8]\}_{actual} \{r_w + e\} \quad (5)$$

여기서, {e} = 오차벡터

식 (4)에서 스핀들 좌표계의 원점을 절삭점으로 잡으면 {r_s}_{actual} = {r_s}_{ideal} = {0}이 되고, 이 점에 대한 공작물 좌표계내에서의 이상적인 절삭점에서의 위치벡터 {r_w}는 식 (4)로부터 식 (6)과 같이 되며 식 (5)로부터 오차 벡터는 식 (7)과 같이 주어진다.

$$\{r_w\} = [H]_{ideal}^{-1} \{0\} \quad (6)$$

$$\{e\} = [H]_{actual}^{-1} \{0\} - \{r_w\} \quad (7)$$

여기서

$$[H] = [{}^1T_2][{}^2\phi_3][{}^3T_4][{}^4\phi_5][{}^5T_6][{}^6\phi_7][{}^7T_8]$$

식 (7)에서 동차변환행렬의 직교성을 이용하고 고차항

을 소거하여 정리하면 식 (8)과 같이 최종적인 열변형 오차 모델을 얻게 된다.

$$e_x = -(y + \sum_{i=1}^n b_i) a_4^s(t) - (y + \sum_{i=1}^n b_i) a_3^s(t) - \sum_{i=1}^n b_i a_2^s(t) - b_1 a_1^s(t) + (z + \sum_{i=1}^n c_i) \beta_4^s(t) + (z + \sum_{i=1}^n c_i) \beta_3^s(t) + (z + \sum_{i=1}^n c_i) \beta_2^s(t) + c_1 \beta_1^s(t) - (y + \sum_{i=1}^n b_i) a_3(x, t) - (y + \sum_{i=1}^n b_i) a_2(y, t) - b_1 a_1(z, t) + (z + \sum_{i=1}^n c_i) \beta_3(x, t) + (z + \sum_{i=1}^n c_i) \beta_2(y, t) + (z + c_1) \beta_1(z, t) - \sum_{i=1}^n \delta a_i(t) - \delta_{xx}(x, t) - \delta_{yy}(y, t) - \delta_{zz}(z, t)$$

$$e_y = (x + \sum_{i=1}^n a_i) a_4^s(t) + \sum_{i=1}^n a_i a_3^s(t) + \sum_{i=1}^n a_i a_2^s(t) + a_1 a_1^s(t) - (z + \sum_{i=1}^n c_i) \gamma_4^s(t) - (z + \sum_{i=1}^n c_i) \gamma_3^s(t) - (z + \sum_{i=1}^n c_i) \gamma_2^s(t) - c_1 \gamma_1^s(t) + (x + \sum_{i=1}^n a_i) a_3(x, t) + \sum_{i=1}^n a_i a_2(y, t) + a_1 a_1(z, t) - (z + \sum_{i=1}^n c_i) \gamma_3(x, t) - (z + \sum_{i=1}^n c_i) \gamma_2(y, t) - (z + c_1) \gamma_1(z, t) - \sum_{i=1}^n \delta b_i(t) - \delta_{xx}(x, t) - \delta_{yy}(y, t) - \delta_{zz}(z, t) \quad (8)$$

$$e_z = -(x + \sum_{i=1}^n a_i) \beta_4^s(t) - \sum_{i=1}^n a_i \beta_3^s(t) - \sum_{i=1}^n a_i \beta_2^s(t) - a_1 \beta_1^s(t) + (y + \sum_{i=1}^n b_i) \gamma_4^s(t) + (y + \sum_{i=1}^n b_i) \gamma_3^s(t) + \sum_{i=1}^n b_i \gamma_2^s(t) + b_1 \gamma_1^s(t) - (x + \sum_{i=1}^n a_i) \beta_3(x, t) - \sum_{i=1}^n a_i \beta_2(y, t) - a_1 \beta_1(z, t) + (y + \sum_{i=1}^n b_i) \gamma_3(x, t) + (y + \sum_{i=1}^n b_i) \gamma_2(y, t) + b_1 \gamma_1(z, t) - \sum_{i=1}^n \delta c_i(t) - \delta_{xx}(x, t) - \delta_{yy}(y, t) - \delta_{zz}(z, t)$$

여기서, $\delta a_1, \delta b_1, \delta c_1$ = 주축 원점의 X, Y, Z 방향으로의 병진변형오차

$\delta a_2, \delta b_2, \delta c_2$ = Y축 원점에 대한 Z축 원점의 X, Y, Z 방향으로의 병진변형오차

$\delta a_3, \delta b_3, \delta c_3$ = Y축 원점에 대한 X축 원점의 X, Y, Z 방향으로의 병진변형오차

$\delta a_4, \delta b_4, \delta c_4$ = X축 원점에 대한 공작물의 병진변형오차

$\gamma_1^s, \beta_1^s, \alpha_1^s$ = 주축의 각변형오차

$\gamma_2^s, \beta_2^s, \alpha_2^s$ = 킬럼의 각변형오차

$\gamma_3^s, \beta_3^s, \alpha_3^s$ = 새들의 각변형오차

$\gamma_4^s, \beta_4^s, \alpha_4^s$ = 공작물의 각변형오차

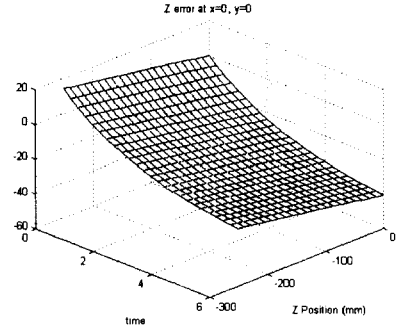
δ_{ii} = i축 방향의 위치오차

δ_{ij} = j축 방향 이송시 i축으로의 진격도오차

(i ≠ j)

식 (8)의 최종적인 각 축방향의 오차를 구하기 위해서는 각각의 병진변형오차, 각변형오차, 위치오차 및 진직도 오차가 먼저 모델링되어야 한다. 기존에 정성종 등과 Venugopal 등이 수행한 실험 결과를 살펴보면, 열변형에 의한 오차가 조인트부의 이송 위치에 대해서는 선형, 시간에 대해서는 지수적인 관계가 있음을 알 수 있다.^(6, 9)

따라서 일정한 열적 환경의 조건에서 오차요소는 위치에 대해 1차 함수로, 그리고 시간에 대해 지수함수로 표현할 수 있다.⁽¹⁰⁾ Fig. 5는 이러한 가정에서 식 (8)에 각각의 오차 성분에 대해 1차 및 지수함수를 적용하여 주축 및 이송계에 일정한 열량이 가해지는 경우의 시뮬레이션 결과이다. 열오차는 위치에 대한 변화량보다 시간에 대한 변화량이 훨씬 크게 나타나고 있는데, 이는 주축계의 열변형에 의한 원점의 열변형량이 이송계의 열팽창에 의한 열변형량보다 더 크게 나타나고 있음을 보여주고 있다.



(c) Z-axis

Fig. 5 Simulation results of thermal error by HTM

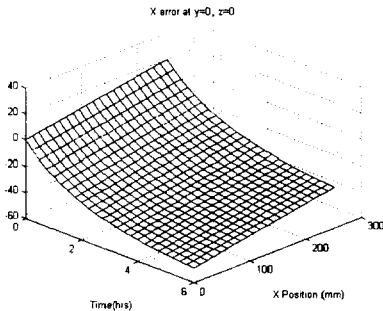
2.2 GMDH 알고리즘

식 (8)에서 모형화된 열변형 오차값을 계산하기 위해서는 각각의 형상오차 및 조인트오차에 대한 정확한 규명이 필요하다. 그러나 각각의 형상오차 및 조인트오차를 규명하는 작업은 복잡하고 많은 시간이 필요할 뿐만 아니라 HTM 모델에서는 오차 성분간의 상호작용이 무시되어 정확한 열오차 모델을 얻을 수 없다. 따라서 본 논문에서는 최종적인 열변형 오차를 직접 측정하여 모델링하는 방법을 택하였다.

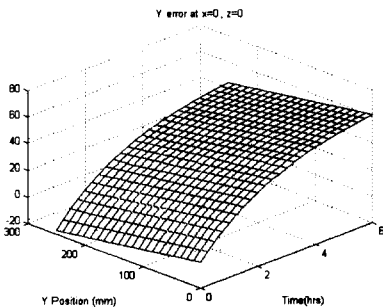
식 (8)에서 열변형은 위치와 시간에 대한 함수로 표현되었다. 공작기계 각각의 요소의 열오차는 일정한 열적 조건에 대해서 지수함수적으로 거동하지만 기계 요소마다 시정수가 다르기 때문에 최종적인 열오차는 주축회전수 및 이송속도의 변화에 의한 발생 열량 변화, 초기 열경계 조건, 냉각 상태 등에 따라 지수함수만으로는 표현할 수 없는 매우 비선형적인 거동을 보인다. 따라서 본 연구에서는 모델의 계수, 독립변수 및 구조 최적화를 통하여 비선형 고차다항식을 자동으로 생성해 주는 GMDH 알고리즘을 이용하여,⁽⁸⁾ 입력 변수인 온도와 출력 변수인 원점의 열변형량 사이의 관계를 구하였다. 식 (9)는 입력변수가 x_i, x_j 이고 출력변수가 y 인 경우 GMDH 방법의 기본식이다.

$$y = A + Bx_i + Cx_j + Dx_i^2 + Ex_j^2 + Fx_i x_j \quad (9)$$

GMDH 알고리즘에서 각각의 층(layer)에서의 변수



(a) X-axis



(b) Y-axis

선정과 최적화 과정에서 사용하는 기준식은 정규기준 (regularity criterion, r_j)과 불편기준(unbiased criterion, u_j)이 있다. 식 (10)으로 주어지는 정규기준은 예측성능은 뛰어나지만 잡음에 민감할 수 있고, 반면 식 (11)로 주어지는 불편기준은 잡음에는 둔감하지만 예측성능이 떨어지는 단점이 있다. 따라서 잡음에 대한 민감도를 줄이고 예측성능을 향상시키기 위하여 식 (12)와 같은 복합기준(combined criterion)을 이용하였다. 복합기준을 적용하기 위해서는 측정데이터를 동일한 크기를 갖는 두 개의 학습데이터 집합과 하나의 검사데이터 집합으로 분류하는 작업이 필요하다.

$$r_j^2 = \frac{\sum_{i=nt+1}^n (y_i - z_{ij})^2}{\sum_{i=nt+1}^n y_i^2} \quad j=1, 2, \dots, (m) \quad (10)$$

$$u_j^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (z_{ij}^A - z_{ij}^B)^2}{\sum_{i=1}^n y_i^2} \quad j=1, 2, \dots, (m) \quad (11)$$

$$c_j = (r_j^2 + u_j^2)^{\frac{1}{2}} \quad j=1, 2, \dots, (m) \quad (12)$$

- 여기서, m = 현 레벨의 입력 변수 개수
- n = 총 데이터 개수
- nt = 학습 데이터 개수
- y_i = 측정된 출력값
- z_{ij} = 학습 데이터에 대한 GMDH 기본식의 출력값
- z_{ij}^A = 학습 데이터 집합 A에 대한 GMDH 기본식의 출력값
- z_{ij}^B = 학습 데이터 집합 B에 대한 GMDH 기본식의 출력값

3. 측정 및 열변형 모델의 파라미터 규명

3.1 모델 생성을 위한 데이터 수집

수직형 머시닝센터 (스트로크 760×430×500 mm)를

대상으로 Fig. 6과 같은 실험 장치로 기계의 각 부분 온도 및 주위 온도와 이와 동기된 원점의 변위를 6시간 동안 1분 간격으로 측정하였다.

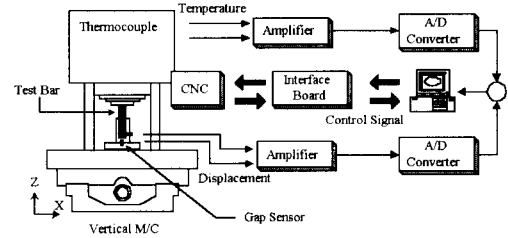


Fig. 6 Schematic diagram of experimental setup

원점의 변화량은 Fig. 7에 보인 테스트바와 측정용 지그에 고정된 갭센서를 사용하여, X, Y, Z 축방향에 대해 학습데이터를 구축하였다. Fig. 8은 테스트바와 갭센서에 의해 측정된 변위의 신뢰성을 확인하기 위하여 Y축 열변형에 대해 레이저 측정장치(HP5529A)에 의해 측정된 데이터를 기준으로 비교한 결과이다. 레이저 측정데이터를 기준으로 한 갭센서 측정값의 오차는 평균 $-0.139\mu\text{m}$, 표준편차 $0.777\mu\text{m}$ 으로 양호한 결과를 보이고 있다. 테스트바와 갭센서를 이용한 측정장치는 레이저 장치에 비해 설치가 매우 용이하고 비교적 저가에 구현할 수 있으며 3축 오차를 동시에 측정할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 작업공간을 작게 차지하고 측정 시간이 짧기 때문에 모델의 수정작업이 매우 간단해진다.

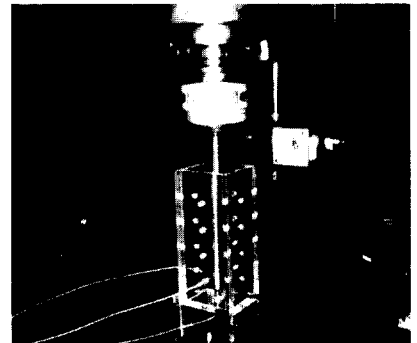


Fig. 7 Instruments for thermal deformation measuring

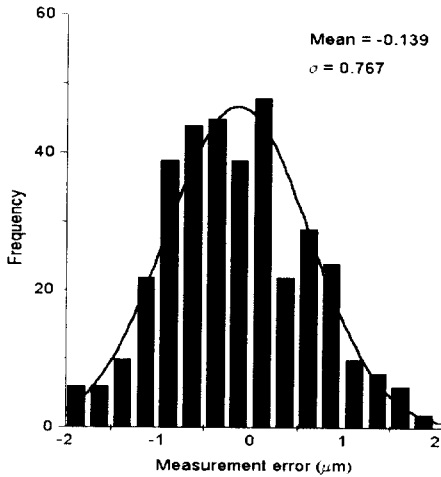


Fig. 8 Comparison gap sensor measurement with laser measurement

온도측정에는 64개의 T형 열전대, 열전대신호의 증폭과 샘플을 위한 A/D 변환기 (Metrabyte DAS-20)를 이용하였다. 내부열원과 외부열원에 의한 영향과 전혀 다양한 절삭조건에서의 열변형 모델의 적응성을 확인하기 위하여 외부 열원인 실내 온도를 자연스럽게 방지하고 주축을 랜덤하게 회전시키면서 데이터를 채취하였다.

이상의 실험조건으로 기계 각부의 온도 및 원점의 열변형량을 채취한 결과, 대표적인 15개 측정점의 온도변화와 원점의 열변형량을 각각 Fig. 9와 Fig. 10에 도시하였다. 최고 7°C 온도 변화에 31μm의 열변형이 발생하였으며, 주축회전에 의하여 Z 축 외에도 X 및 Y 축 방향으로도 많은 열변형이 생겼음을 알 수 있다. 이는 내적 및 외적 열원과 냉각 등의 열적 비대칭성에 기인한 것으로 주축의 열변형이 선연뿐만 아니라 비틀림의 형태로도 발생함을 보여주고 있다. 본 연구에서 측정된 열변형은 각 좌표축 원점 근방에서의 측정값이고 열변형오차는 위치에 대하여 선형적으로 변하므로, 열변형 측정 위치의 좌표값이 커질수록 열변형 오차의 크기도 선형적으로 증가할 것으로 기대된다.

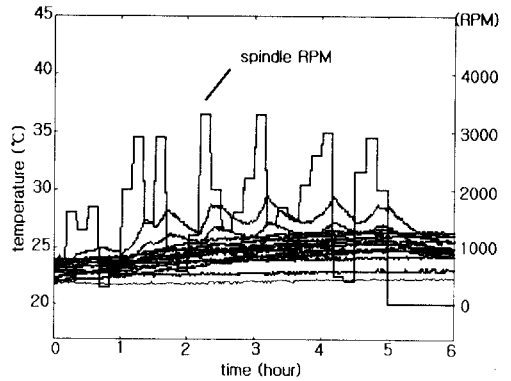


Fig. 9 Temperatures at each location

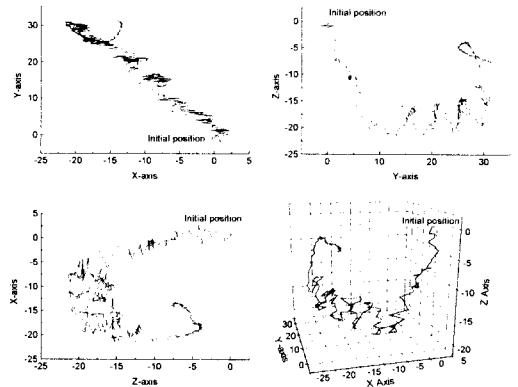


Fig. 10 Deformation of origin

3.2 학습에 의한 GMDH 모델 생성

GMDH 모델 생성을 위한 첫 번째 작업은 입력 데이터군의 설정이다. 독립 변수는 64 채널에서 측정된 현재와 1스텝 이전의 온도데이터로 총 128개이고, 종속 변수는 갠센서로 측정된 각 축의 변위 데이터이다. 0~4시간 동안의 학습 데이터와 4~6시간 사이의 검사 데이터 각각 구분하였다. 여기서 1스텝 이전의 온도데이터를 입력데이터로 이용함으로써 열변형의 동적 특성을 고려하고, 같은 수의 측정점으로부터 더 많은 독립변수를 얻을 수 있다.

Fig. 11은 생성된 GMDH 모델에 의한 Z 축 열변형의 예측결과를 도시한 것이다. 최대 예측 오차는 각각 X 축 5.6μm, Y 축 2.5μm, Z 축 4.5μm으로 공작기계 원점의 열변형을 잘 추정함을 알 수 있다. 이 때 선정된 온도 측정

점수는 총 8개로서 주로 열원인 주축계 근방에 위치하였다.

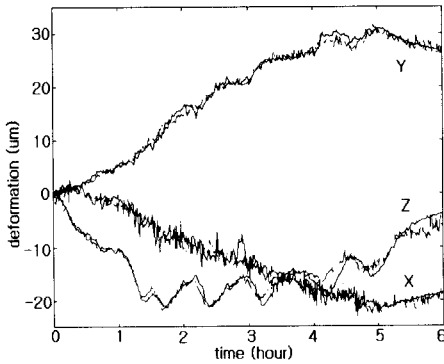


Fig. 11 Learning result by GMDH model

4. 보상실험

원점 열변형 보상은 온라인으로 측정된 온도 데이터를 앞절에서 생성된 GMDH 모델에 입력시켜 계산된 보상값 만큼 공작물의 원점을 이동시키므로써 구현된다. 예를 들어, 3축 머시닝센터에서 X, Y, Z 방향의 원점 열변형 오차가 각각 $\Delta O_x, \Delta O_y, \Delta O_z$ 라면 원점은 X, Y, Z 방향으로 각각 $-\Delta O_x, -\Delta O_y, -\Delta O_z$ 만큼 이동시킨다.

Fig. 12는 공작물 원점 이동법에 의한 보상 원리를 도식화한 것이다. 가공 시작 후 최초로 열변형 오차를 계산하여 보상하면, 그후로부터의 보상시에는 이전 보상단계에서 이동된 기준원점 좌표에 대해 상대적으로 발생된 열변형을 계산하여 보상해야 한다.

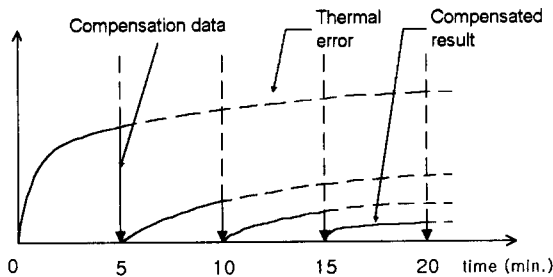


Fig. 12 Work origin compensation logic

Fig. 13은 공작물 원점 이동법에 의한 머시닝 센터 원점의 열변형 보상 실험 장면이다. 보상을 위한 제어는 컴퓨터와 CNC 제어로 분류되어 있고 제작한 인터페이스 보드를 통해 제어신호 및 보상 데이터를 전송한다.

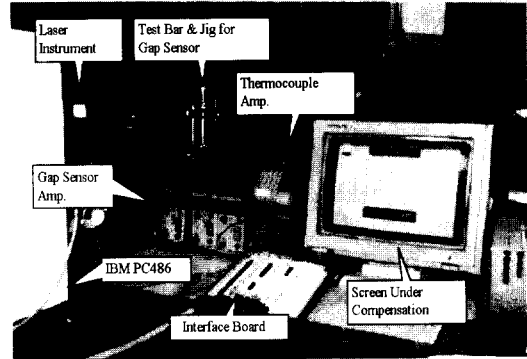


Fig. 13 Experimental Setup for Compensation

Fig. 14는 보상 제어의 흐름도이다. 컴퓨터의 보상 작업은 매 1분마다 기계 각부의 온도를 측정하여 메모리에 저장하는 모듈, 명령 송수신 및 보상값 전송 모듈과 보상값 계산 모듈로 구성되어 있고, 보상값 계산 및 전송은 CNC 제어기에서 보내는 하드웨어 인터럽트 신호에 의해 구동된다. CNC에서의 보상 작업은 데이터 초기화, 명령 송수신, 공작물 원점 이동 및 컴퓨터 작동 감시 모듈 등으로 구성되어 있다. 보상 작업을 위한 CNC 프로그램은 가공프로그램 가동중에 매크로 프로그램 O4000을 호출함으로써 처리되기 때문에 실제 가공중에 보상을 수행할 수 있는 장점이 있다. PC와 CNC사이의 송수신 데이터의 정의는 PC를 기준으로 다음과 같다.

```

Define_Signal(data.control) {
    DigitalIn(bit 4, compensation_start);
    DigitalIn(3~2, unreserved);
    DigitalIn(1~0, axis_flag);
    DigitalOut(15, PC_working_check_flag);
    DigitalOut(14~13, axis_flag);
    DigitalOut(12~0, compensation_data); }
    
```

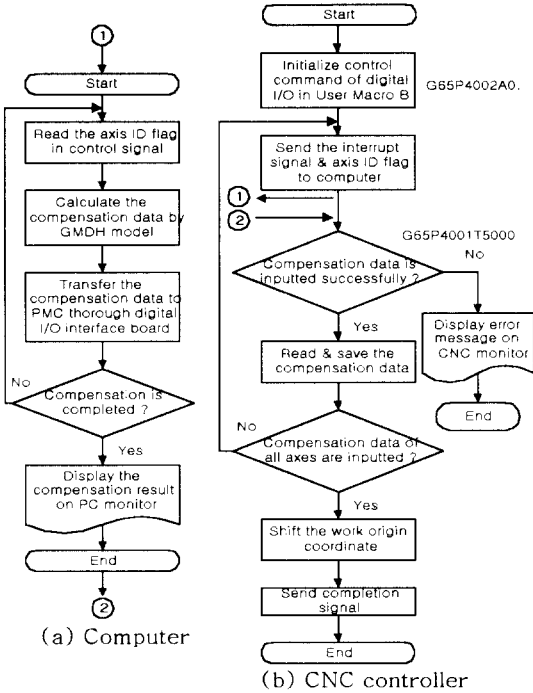
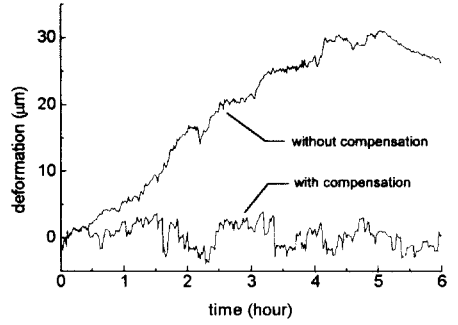
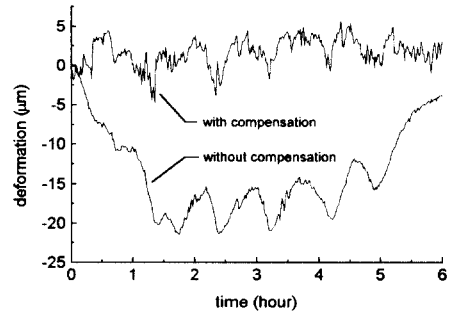



Fig. 14 Flow Chart of Compensatory control algorithm

Fig. 15는 모델링과 동일한 실험 조건에 대해 5분 주기로 공작물 원점 이동법을 적용하여 원점 보상 결과를 각 축에 대해 도기한 것으로서 95%의 신뢰구간에서 X 축은 약 4 μ m, Y 축은 3 μ m, Z 축은 4 μ m 이내로 원점의 열변형이 제어됨을 알 수 있다.



(b) Y-axis



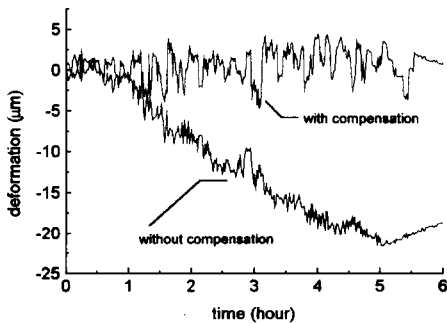
(c) Z-axis

Fig. 15 Compensation Results

5. 결론

수직형 머시닝센터를 대상으로 무부하 상태에서 주축회전수를 랜덤하게 변화시킨 경우, 기계 각부분의 온도측정치 및 시간이력 데이터를 독립 변수로 하는 GMDH 모델에 의해 주축원점의 열변형량을 추정하고 공작물 원점 이동법에 의해 보상하는 것을 시도하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 주축 및 이송축의 원점의 병진변형오차 및 각변형오차가 포함된 형상오차 및 조인트 오차의 동차변환행렬을 이용하여 열변형 모델을 구성하였다.
- (2) 기존의 실험결과를 이용한 시뮬레이션을 통하여 원점의 열변형이 이송위치에 대한 열변형량보다 더 크게 발생함을 확인하였다.



(a) X-axis

- (3) GMDH 알고리즘을 이용하여 온도 측정점을 자동으로 선정하고, 기계 각 부분의 온도에 관해 비선형적인 열변형 모델을 자동으로 생성하였다.
- (4) 갯센서와 테스트바를 이용하여 원점의 열변형을 측정함으로써 모델링 및 수정작업을 용이하게 하였다.
- (5) 생성된 열변형 예측모델과 공작물 원점 이동법을 이용한 공작기계 원점의 실시간 열변형 보상 시스템을 개발하여 적용한 결과, 원점 변화량이 $31\mu\text{m}$ 에서 최대 $\pm 5\mu\text{m}$ 이내로 유지됨을 확인하였다.

참 고 문 헌

- (1) Weck, M., Mckeown, P., Bonse, R. and Herbst, U., "Reduction and Compensation of Thermal Errors in Machine Tools", *Annals of the CIRP*, Vol. 44, No. 2, pp. 589~598, 1995.
- (2) Chen, J. S., Yuan, J. X., Ni, J. and Wu, S. M., "Real-time Compensation for Time-variant Volumetric Errors on a Machining Center", *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 115, pp. 472~479, 1993.
- (3) Toshimichi Moriwaki, Eiji Shamoto and Masahiro Kawano, "Estimation of Thermal Deformation of Machine Tool by Applying Neural Network", *日本機械學會論文集(C編)*, 61卷 584号, pp.427-432, 1995.
- (4) Blomquist, Donald S., "Quality in Automated Manufacturing", *Control and Dynamic Systems*, Vol. 45, pp.163-196, 1992.
- (5) 안중용, 정성종, "GMDH 알고리즘에 의한 머시닝 센터 원점의 열변형 예측", *대한기계학회논문집 A권*, Vol. 22, No. 12, pp. 2126~2135, 1998.
- (6) 양종태, 정성종, "측정플레이트를 이용한 공작기계 오차보상", *한국정밀공학회 추계학술대회논문집*, pp. 187~192, 1994.
- (7) Chen, J., S. and Chiou, G., "Quick Testing and Modeling of Thermally Induced Errors of CNC Machine Tools", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 35, No. 7, pp. 1063~1074, 1995.
- (8) Liu, C. R., Ferreira, P. M., Liang, G. R. and Srinivasan, R., "Technological Developments In Intelligent Manufacturing Systems", *Intelligent Manufacturing Systems*, Vol. I, Elsevier Science Publishers, pp. 93~104, 1988.
- (9) Venugopal, R., "Thermal Effects on the Accuracy of Numerically Controlled Machine Tools (Numerical Methods, Experimental)", Ph. D. Dissertation, Purdue University, West Lafayette, 1985.
- (10) Srivastava, A. K., Veldhuis, S. C. and Elbestawit, M. A., "Modelling Geometric and Thermal Errors In a Five-axis CNC Machine Tool", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 35, No. 9, pp. 1321~1337, 1994.