

# CNC 공작기계 스피들 유닛의 5자유도 열변형 오차측정 및 모델링 기술

박희재\* · 이석원\*\* · 권혁동\*\*\*  
(1999년 9월 22일 접수)

## Thermal Error Measurement and Modeling Techniques for the 5 Degree of Freedom(DOF) Spindle Unit Drifts in CNC Machine Tools

Heui Jae Pahk, Suk Won Lee and Hyuk Dong Kwon

**Key Words :** Machine Tool(공작기계), Error Measurement(오차측정), Modeling(모델링), Error Compensation(오차보정)

### Abstract

Thermally induced errors have been significant factors affecting the machine tool accuracy. In this paper, the spindle thermal error has been focused, where the 5 degree of freedom thermal error components are considered. An effective measurement system has been devised for the 5 DOF thermal errors, consisting of gap sensors and thermocouples around the micro-computer interfaced environment. Several thermal error modeling techniques are also implemented for the thermal error prediction: multiple linear regression, neural network and system identification methods, etc. The performance of the thermal error modeling techniques is evaluated and compared, giving the system identification method as the optimum model having the least deviation. The developed system for the thermal error measurement and modeling was practically applied to a CNC machining center, and the spindle thermal errors were effectively compensated around the micro computer-machine tool interfaced networks. The machine tool accuracy was improved about 4-5 times typically.

### 1. 서론

열변형 오차는 공작기계의 정밀도에 중요한 요소가 되어 왔으며 일반적으로 볼스크루, 베어링, 너트, 축 구동부 모터, 가이드부의 마찰, 가공공정, 윤활유의 유동, 주위의 온도 등과 기계 구조 내부의 열원으로 인해 야기된 공작기계 요소의 변형으로부터 나타난다. 열변형 오차는 공작기계 전체 오차량의 약 70%를 차지한다고 보고된 바 있으며<sup>(1)</sup> 그 중에서도 스피들의 열변형 오차 또는 스피들 유닛의 드리프트(drift)가 전체 열변형 오차의 많은

부분을 차지하고 있다.<sup>(2)</sup> 본 논문에서는 갭 센서와 온도 센서를 사용하여 스피들의 변형량과 온도값들을 측정하였으며, 스피들의 5 자유도 변형량을 예측하기 위하여 다중 선형 회귀법(multiple linear regression), 신경 회로망(neural network), 시스템 검증법(system identification method)의 세가지 열변형 오차 모델링 방법을 사용하였다. 스피들 열변형 오차의 모델들은 각각 프로그램되어 오차량들을 예측하였으며, 공작기계와 마이크로 컴퓨터 사이의 통신 네트워크를 통하여 예측된 오차량들을 보정하는 작업을 수행하였다. 결과적으로 시스템 검증법에 의한 모델이 다른 두 모델보다 나은 결과를 나타냈으며 보정후 공작기계의 잔여오차는 보정전 오차의 70~80%를 감소시켰다.

\* 회원, 서울대학교 기계항공공학부  
E-mail : hjpahk@plaza.snu.ac.kr  
TEL : (02)880-7467 FAX : (02)875-8955  
\*\* 서울대학교 대학원  
\*\*\* 회원, 한국생산기술연구원

## 2. 스피들 열변형 오차 측정

### 2.1 5자유도 스피들 열변형 오차측정 시스템

일반적으로 공작기계 스피들의 오차는 6 자유도의 성분을 가진다.<sup>(6)</sup> 두개의 반경방향 오차, 한 개의 축방향 오차, 두 개의 틸팅(tilting) 오차, 그리고 한 개의 회전 오차가 그것이다. 그러나 공작기계의 정밀도의 관점에서 본다면, 스피들의 회전 오차는 무시될 수 있으므로, 본 논문에서는 나머지 5 자유도의 스피들 열변형 오차만을 고려하였다. Fig. 1 에서 5 자유도 스피들 오차를 측정하기 위한 장치 구조를 보였다. 측정 장치를 살펴보면 2 개의 마스터볼로 이루어진 치구가 스피들에 장착되어 있고 그 주위에 5 개의 갭 센서가 배열되어 이의 측정값들을 PC에서 받아들이게 되어 있다. 정전용량형인 갭 센서들은 0.1  $\mu\text{m}$ 의 분해능을 가지며, 그 측정치들은 온도 보정 모듈을 가지고 있다. 두 개의 마스터 볼은 각기 0.1  $\mu\text{m}$  이내의 진원도 오차를 가지도록 캘리브레이션(calibration) 되어 있으며 갭 센서에서 측정된 신호는 증폭과정을 거쳐 A/D 변환 보드를 통해 약 100kHz의 샘플링 속도로 디지털 신호로 변환된다. 이러한 측정 시스템의 높은 샘플링 속도는 기계의 운전상태에서도 실시간으로 열변형 오차를 측정할 수 있었다. 스피들의 5 자유도 오차를 측정하는 것과 동시에 공작기계 구조의 곳곳에 부착된 열전대를 통하여 온도 변화량도 측정하였다. 측정에 사용한 열전대는 T 타입이고 측정 가능 온도 범위는 -270 $^{\circ}\text{C}$ 에서 400 $^{\circ}\text{C}$ 까지이며 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 의 분해능을 가진다<sup>(7)</sup>. Fig. 2 는 공작기계 구조물에 부착된 열전대의 위치를 보여준다. 2 개의 열전대는 스피들의 하부 베어링에, 3 개는 상부베어링에, 2 개는 두 개의 베어링 사이, 1 개는 스피들과 컬럼사이로 모두 8 개의 열전대를 스피들과 스피들 하우징 주위에 부착하였고, 8 개의 열전대는 구조물의 주위, 2 개의 열전대는 공기 온도를 측정하며, 1 개의 열전대는 갭 센서를 고정시키는 치구의 온도를 측정한다. 열전대의 측정 신호는 각기 앰프를 거쳐 증폭된 후, GPIB 카드를 통해 마이크로 컴퓨터로 보내진다. 스피들 열변형 오차를 효율적으로 측정하기 위해 측정 센서들을 마이크로 컴퓨터에 연결하여 실시간 측정작업을 수행하였다.

오랜 시간이 걸리는 열변형 오차 측정을 자동화한 측정과정은 다음과 같다. 측정 자동화 프로그램에서 총 측정 시간과 측정 간격이 입력되면, PC가 RS232C 직렬 접속 연결을 통해 CNC 공작기계를 프로그램 되어진 회전속도로 가동하도록

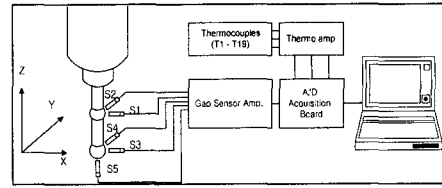


Fig. 1 Sensors for measuring spindle drift errors

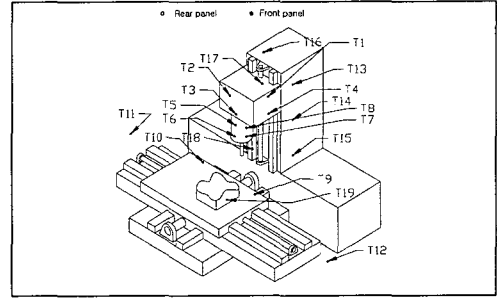


Fig. 2 Thermal sensor location

제어한다. 측정시, PC에서 “M19” 명령을 공작기계로 보내어 스피들이 엔코더의 기준 신호(영점)를 내보내는 위치에서 정지하게 한다.

스피들이 정지했을 때 5 개의 갭 센서로부터 스피들의 오차 성분들을 얻어내고 동시에 19 개의 열전대로부터 공작기계 각 부분의 온도값들을 얻어낸다. 측정 작업이 끝나고 나면, PC에서 스피들 회전의 명령을 다시 공작기계로 보냄으로써 다음 측정 명령이 주어질 때까지 스피들이 회전하게 된다. 이러한 모든 과정은 지정된 전체 측정시간이 끝날 때까지 계속 반복한다. Fig.3 에 온라인 측정 작업의 플로우 차트를 보여주고 있다.

### 2.2 여러 가지 가동 조건에서의 스피들 열변형 오차

개발되어진 열변형 오차 측정 시스템에는 3 가지 형태의 CNC 공작기계 가동 조건을 적용하였다. (1)일정한 회전 속도 가동 조건(constant running condition, 스피들 회전속도가 3000 rpm으로 일정) (2)주기적 회전 속도 가동 조건 (progressive running condition, 스피들 회전속도가 10분 간격으로 점차적으로 증가/감속) (3)임의적 회전 속도 가동 조건 (random running condition, 스피들 속도가 임의로 선택됨).

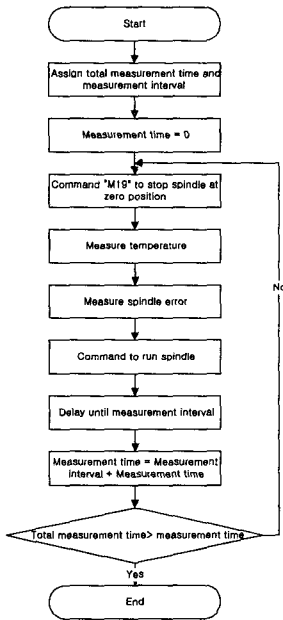


Fig. 3 Flow chart of the on line measurement feature implemented

2.2.1 일정한 회전속도 가동 조건

공작기계 스펀들이 3000 rpm 으로 일정하게 4 시간 동안 회전하다가 다음 4 시간동안 정지한다.(Fig. 4a 참조) 회전/정지하는 모든 가동시간동안 온도와 스펀들의 5 자유도 오차측정이 일정 시간 간격을 두고 행해진다. Fig. 4(b)에 전 측정 시간에 대한 공작기계 몇 부분에서의 온도 변화 추이를 나타내었다. Fig. 4(b)에서 알 수 있듯이 스펀들 베어링이 있는 위치에서의 열전대(T6)의 측정치가 23.5℃에서 40.0℃까지 증가하여 가장 민감한 반응을 보였다. 또한 스펀들의 5 자유도 오차성분들도 측정되어 Fig. 4(c)에 나타내었다. S1에서 S5까지의 5 개의 잭 센서는 마스터볼이 가까워질 때 양의 값을 가지도록 하였다. 위의 가동조건은 스펀들 하우징이 가열될 때와 냉각될 때의 가동조건을 첨가함으로써 좀 더 정밀한 모델링을 하기 위함이다. X 방향으로 최고 3 μm만큼 열에 의한 변형이 일어났고(S1), Y 방향으로는 최고 -50 μm만큼(S2), 그리고 Z 방향으로는 최고 47 μm만큼(S5) 열에 의한 변형량이 측정되었다.

2.2.2 주기적 회전 속도 가동 조건

스핀들의 회전 속도를 0 rpm, 1000 rpm, 2000 rpm, 3000 rpm 의 순으로 순차적으로 증가시켰다가 다시 3000 rpm, 2000 rpm, 1000 rpm, 0 rpm 의 순으로

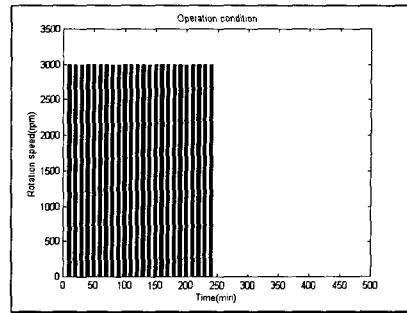


Fig. 4 (a) Constant spindle running condition

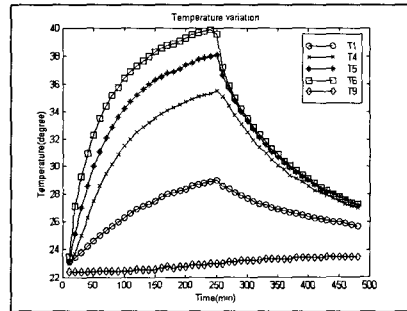


Fig. 4 (b) Temperature variation for constant spindle running condition

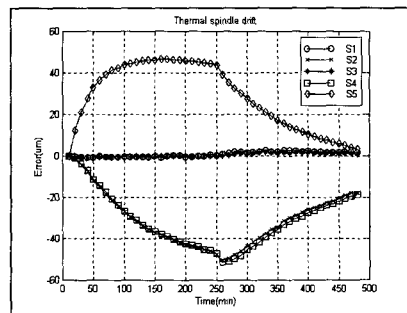


Fig. 4 (c) Thermal spindle drift for constant spindle running condition

점차적으로 감소하는 것을 반복한다.(Fig. 5(a) 참조) 주기적 회전 속도 가동 조건으로 가동되어지는 동안 온도와 스펀들 5 자유도 오차값들이 측정되어진다. Fig. 5(b)에 시간에 대한 온도값의 변화가 나타나 있다. 온도값 변화의 추세는 스펀들 회전 속도 변화의 경향과 같다는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 5(c)에 스펀들 열변형값이 도시되어 있으며, 스펀들 오차량은 스펀들 온도 변화에 가장 크게 영향을 받는다는 것을 볼 수 있다.

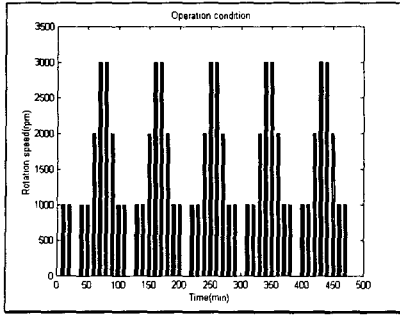


Fig. 5 (a) Progressive spindle running condition

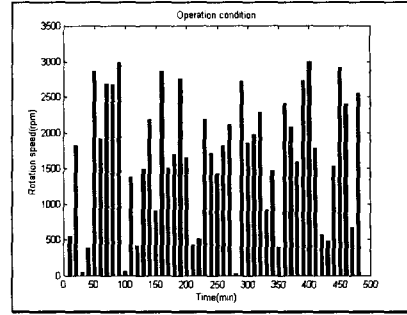


Fig. 6 (a) Random spindle running condition

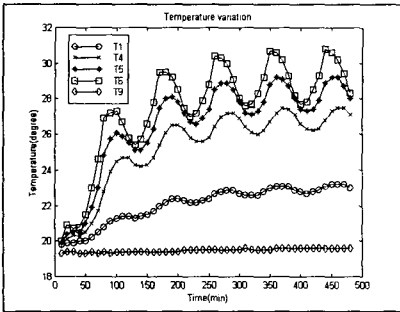


Fig. 5 (b) Temperature variation for progressive spindle running condition

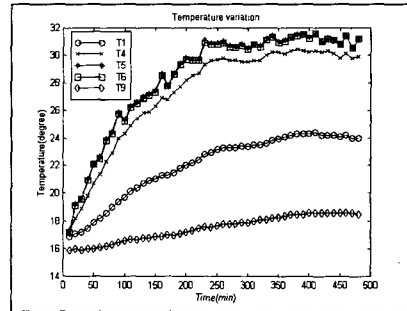


Fig. 6 (b) Temperature variation for random spindle running condition

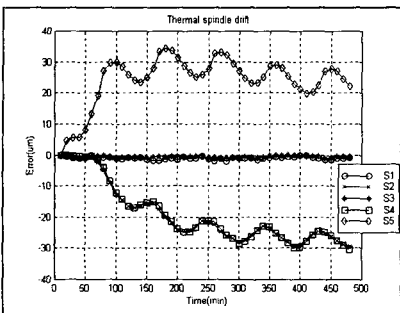


Fig. 5 (c) Thermal spindle drift for progressive spindle running condition

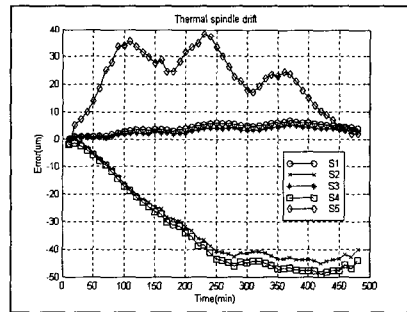


Fig. 6 (c) Thermal spindle drift for random spindle running condition

2.2.3 임의적 회전 속도 가동 조건

공작기계 스피들을 임의의 회전속도로 가동하였을 때 실험하는 동안의 회전속도의 프로파일은 Fig. 6(a)에 도시하였다. 역시 온도와 스피들의 5 자유도 오차값도 측정하였다. Fig. 6(b)는 임의적 회전 속도 가동 조건에서의 공작 기계 각 부분의 온도 변화 추이를 보여주며, 온도값 역시 주어진 가동 조건에 따라 변하는 것을 볼 수 있다. 스피들의 오차량도 Fig. 6(c)에서 보여지는 바와 같이 온도값과 같은 경향을 보여 온도와 스피들 오차량 사이의 밀접한 관계를 보여 주었다.

위의 세가지 전형적인 가동조건에서의 온도와

열변형 오차량의 측정값으로부터 두 데이터사이의 강한 연관관계가 있음을 알 수 있다. 그러므로 다음 절에 설명될 열변형 오차 모델링 과정을 통하여 온도와 열변형 오차량의 관계를 얻어낼 수 있다.

3. 스피들 열변형 오차 모델링

3.1 모델링 방법

공작기계의 열변형 오차를 모델링하는 데에는 몇 가지 방법이 있으나 본 논문에서는 3가지 서로 다른 열변형 오차 모델링 방법을 사용하여 수행해 보았다. : 다중 선형 회기 모델(multiple linear

regression model), 신경 회로망 모델(neural network model), 시스템 검증 모델(system identification model)

### 3.1.1 다중 선형 회기 모델(Multiple linear regression model)

온도와 스피들의 오차간의 관계는 다중 선형 회기법으로 모델링 될 수 있다.  $t_i(I=1,2,\dots,N)$ 를 공작기계 각 부분들의 온도값으로 놓고, 스피들의 5 자유도 열변형 오차 중 하나의 요소를  $y_i$  로 두면, 다음과 같이 선형적인 관계로 모델링 된다.

$$y_i = a_{11}t_1 + a_{12}t_2 + a_{13}t_3 + a_{14}t_4 + \dots + a_{1n}t_n + b_1 \quad (1)$$

여기서  $a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{14}, \dots, a_{1n}$  은 온도값에 대한 계수,  $b_1$  은 열변형 오차에 있어서의 상수이다. 식 (1)은 스피들의 5 자유도 열변형 오차의 나머지 성분들에도 적용, 확장되어 다음과 같이 행렬의 형태로 나타낼 수 있다.

$$Y = AT \quad (2)$$

여기서,  $Y = [y_1 \quad y_2 \quad y_3 \quad y_4 \quad y_5]^T$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \Lambda & a_{1n} & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \Lambda & a_{2n} & b_2 \\ M & M & M & O & M & M \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & \Lambda & a_{5n} & b_5 \end{bmatrix}$$

$$T = [t_1 \quad t_2 \quad t_3 \quad \Lambda \quad t_n \quad 1]^T$$

식 (2)에서, Y는 5 자유도 열변형 오차를 나타내는 열벡터이며, A는 모델계수 행렬이다. T는 온도값들을 나타내는 열벡터이며 여기서 아래 첨자 n은 공작기계의 각 부분에 부착되어 있는 열전대의 색인 번호이다. 온도계수 행렬 A는 측정데이터들로부터 최소 자승법을 이용하여 계산되어지며 다음과 같이 효율적인 가상 역변환 기법(pseudo-inverse technique)을 이용하였다.

$$A = YT^T (TT^T)^{-1} \quad (3)$$

여기서  $T^T$ 는 온도 열벡터의 전치행렬이다. 이런 과정을 거쳐서 식 (2)를 통해 온도값들과 열변형 오차사이의 관계를 구성할 수 있으며 다중 선

형 회기 모델이 완성된다.

### 3.1.2 신경 회로망(Neural network)

신경 회로망이란 일종의 다중 비선형 함수이며 여기서의 계수는 가중치로 불리워진다. 신경 회로망에 있어서 계수들은 백프로파게이션(back propagation)이라는 반복적인 학습화 과정을 거쳐 구해진다. 그러므로 신경 회로망은 다중 입력과 다중 출력을 가지는 비선형 시스템의 모델링에 적절하다고 할 수 있다. 신경 회로망에는 세 타입의 층이 있다. Fig. 7에서 보듯이 입력층(input layer), 은닉층(hidden layer) 그리고 출력층(output layer)이 그것이다. 이를 열변형 오차에 적용시킨다면 입력층은 온도값을 사용하고, 출력층은 스피들의 5 자유도 열변형 오차를 사용한다. 입력층과 출력층에 들어가는 데이터는 -1과 1 사이의 값을 가져야 하는데, 이는 S자 모양의 만곡함수(sigmoid function)의 성질을 이용한 것이다. 은닉층에는 중개 노드(intermediate node)들이 들어가며, 이는 신경 회로망 모델이 최소 오차를 가지도록 결정지워진다. 실험값들을 통하여 이러한 은닉층이 결정되면 출력층, O가 계산되어지고 목적 함수(cost function), E는 다음과 같이 정의된다.

$$O_i^\mu = g\left(\sum_k (w_{ik} \xi_k^\mu)\right) \quad (4)$$

$$E(w) = \sum_{i\mu} (\zeta_i^\mu - O_i^\mu)^2 = \sum_{i\mu} (\zeta_i^\mu - g(\sum_k w_{ik} \xi_k^\mu))^2 \quad (5)$$

여기서  $O_i^\mu$ 는 i번째 출력 모델의  $\mu$ 번째 유형이며, 다음에 나타나는 g는 비선형 성질의 만곡 함수를 나타낸다.

$$g(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \text{ for variance } x \quad (6)$$

또한  $w_{ik}$ 는 i번째 층의 k번째 노드의 가중치 값이며,  $\xi_k^\mu$ 는 이전 층의 k번째 노드의  $\mu$ 번째 유형, 그리고  $\zeta_i^\mu$ 는 i번째 측정값의  $\mu$ 번째 유형이다. 가중치 값들은 처음에 임의의 값들을 가지며 반복적인 학습화과정을 통해 변경된다. 가중치 값의 변화량,  $\Delta w_{ik}$ 는 하향 급경사법(steepest descent gradient method)을 통해 계산되어 다음과 같이 정의되어진다.

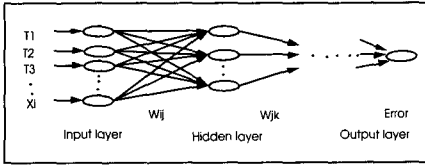


Fig. 7 The component of neural network

$$\Delta w_{ik} = \frac{-\eta}{1-\alpha} \frac{\partial E}{\partial w_{ik}} = \frac{\eta}{1-\alpha} \sum_{\mu} (\zeta_i^{\mu} - O_i^{\mu}) \xi_i^{\mu} \quad (7)$$

여기서  $\eta$ 는 학습률,  $\alpha$ 는 관성률이다. 학습률과 관성률을 적당히 할당하는데 이들 값은 가중치의 수렴속도를 결정한다. 가중치 값의 변화량,  $\Delta w_{ik}$ 가 계산되어진 후 기존 가중치,  $w_{ik}$ 에 더해지고, 식 (5)에 따라 열변형 오차의 측정치와 예상치 사이에 비교가 행해진다. 이러한 과정을 목적함수의 값이 수렴하여 더 이상 작아지지 않을 때까지 반복하여 최종적으로 가중치를 결정한다. 이러한 알고리즘을 가중치를 얻는 학습 과정에서의 백프로파게이션(back propagation)이라 한다. 위와 같은 신경 회로망에 온도값과 열변형 오차사이의 관계를 적용할 수 있다.

3.1.3 시스템 검증법(System identification)

시스템 검증 모델에서는 현재 시간 t에서의 열변형 오차값이 현재 온도값, 과거의 온도값, 그리고 과거의 열변형 오차값에도 영향을 받는다.

$X_t, X_{t-1}, X_{t-2}, \dots, X_{t-n}$ 를 각각 시간 t, t-1, t-2, ..., t-n에서의 열변형 오차값으로 두고,  $a_t, a_{t-1}, \dots, a_{t-n+1}$ 를 마찬가지로 각각 시간 t, t-1, ..., t-n+1에서의 온도값으로 둔다. 그러면 열변형 오차값과 온도값을 다음과 같이 연관지을 수 있다.

$$X_t - \phi_1 X_{t-1} - \phi_2 X_{t-2} - \dots - \phi_n X_{t-n} = \theta_1 a_t - \theta_2 a_{t-1} - \theta_3 a_{t-2} - \dots - \theta_m a_{t-m+1} \quad (8)$$

여기서  $\phi_n$ 과  $\theta_m$ 은 모델의 계수들이며, 정수 n, m은 각각 3, 2로 선택하였다. 그 이유는 차수를 높여도 결과에 커다란 변화가 없기 때문이다. 식 (8)은 다음과 같이 행렬식으로 표현할 수 있다.

$$Y = XA \quad (9)$$

여기서  $Y = [X_t, X_{t-1}, X_{t-2}, X_{t-3}]^T$ 로 열변형 오차의 열변형 벡터를 나타내며,

$A = [\phi_1, \phi_2, \phi_3, \theta_1, \theta_2]^T$ 는 계수들의 열벡터, 그리고 X는 열변형 오차와 온도데이터들의 행렬이다.

$$X = \begin{bmatrix} X_{t-1} & X_{t-2} & X_{t-3} & -a_t & -a_{t-1} \\ X_{t-2} & X_{t-3} & X_{t-4} & -a_{t-1} & -a_{t-2} \\ X_{t-3} & X_{t-4} & X_{t-5} & -a_{t-2} & -a_{t-3} \\ X_{t-4} & X_{t-5} & X_{t-6} & -a_{t-3} & -a_{t-4} \end{bmatrix}$$

계수 벡터 A는 주어진 열변형 오차와 온도 데이터로부터 가상 역변환 기법을 이용하여 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$A = [XX^T]^{-1} YX^T \quad (10)$$

그러므로 식 (8)과 식 (9)로부터 열변형 오차와 온도와의 관계가 모델링되며 현재의 열변형 오차값들을 예측할 수 있다.

4. 스피들의 5 자유도 열변형 오차 예측의 실제적인 적용

열변형 오차의 측정 및 모델링 기술을 본 실험실에 있는 CNC 공작기계에 실제적으로 적용시켜 보았다. 스피들의 5 자유도 열변형 오차량과 측정된 19개의 온도값들을 개발된 측정 시스템을 사용하여 측정하였으며 이들 데이터를 열변형 오차 모델링 기법에 적용시켰다. 열변형 오차 모델을 완성한 후에 공작기계의 스피들을 다양한 임의의 가동 조건에서 가동시켜 그 때의 5 자유도 열변형 오차의 예상치와 측정치를 비교하였다.

Fig. 8에 전형적인 임의의 가동 조건에서의 5 자유도 열변형 오차의 예상치/측정치를 나타내었다. Fig. 8(a)에 X 축 방향 열변형 오차를 나타내었으며 여기서 원형 마크가 되어있는 것이 측정치를 가리키며, 나머지가 세가지 모델링 기법 - 각각 다중 선형 회기, 신경 회로망, 시스템 검증 - 을 통한 예상치들이다. 6 시간동안 공작기계를 가동하는 동안 X 축 방향으로 최대 65  $\mu$ m의 열변형 오차가 발생하였으며, 측정치와 예상치 사이의 차이는 아주 작았다. Fig. 8(b)에는 Y 축 방향의 열변형 오차에 관한 내용들을 실었으며 측정치와 예상치를 앞과 같은 방법으로 나타내었다. 6 시간(480 분)의 가동동안 Y 축 방향으로 최대 45  $\mu$ m의 오차를 보였으며, 여기서도 열변형 오차의 측정과 예상이 거의 맞아 떨어짐을 볼 수 있다. Y 축 방향의 열

변형 오차는 X 축 방향의 오차보다 약 7배의 크기를 가지고 있는 것을 알 수 있으며, 이것은 공작기계 Y 축 방향으로의 대칭적이지 않은 구조에 의한 것으로 사료된다.

Fig. 8(c)는 Z 축 방향 오차이고, 최대 열변형 오차는 480 분 가동시간 동안 39  $\mu\text{m}$ 로 기록되어 있다. 그리고 여기서도 역시 측정치와 예상치의 차이가 거의 없었다. 특이한 점은, Z 축 방향 열변형 오차가 가동시간의 처음 200 분동안은 줄어들다가(스핀들의 팽창), 다시 늘어난다는 것이다. 이러한 현상의 이유는 처음 공작기계 스피들 부분의 온도 상승이 Z 축 방향 오차(스핀들 팽창)를 가져와 측정치가 줄어들었으며, 그 후에 공작기계의 수직 칼럼으로 전파된 열이 스피들 주축대의 온도 상승을 야기시켜 Z 축 방향으로의 열변형을 가져와 측정치가 다시 늘어난 것이다.

Fig. 8(d)에는 X 축 틸트 열변형 오차가 나타나 있으며, 총 가동 시간 동안 최대 오차가 -3 arcsec 인 것으로 기록되어져 있다. 또한 여기서도 측정치와 예상치의 차이가 극히 적게 나타났다.

Fig. 8(e)에는 Y 축 기울기 열변형 오차가 나타나 있고, 총 가동 시간 동안 -2.5 arcsec 의 최대 오차가 발생했으며, 측정치와 모델링 되어진 예상치가 거의 같게 나타났음을 알 수 있다.

열변형 오차 측정치와 예상치의 차이의 크기와 모델 기법 사이의 비교를 위해서 열변형 오차 측정치에 대한 예상치의 편차의 제곱근 평균값(root mean square(rms))을 구하였다. Table 1 에 그 결과가 있으며, X 축 방향 오차의 제곱근 평균값(rms)이 다중 선형 회기, 신경 회로망, 시스템 검증 모델에 대하여 각각 0.156  $\mu\text{m}$ , 0.189  $\mu\text{m}$ , 0.152  $\mu\text{m}$ 로 계산되었음을 알 수 있다. 나머지 Y 축 방향, Z 축 방향, X 축 틸트, Y 축 틸트 오차에 대해서도 역시 Table 1 에서 각 모델 기법들에 대한 비교를 수행해 놓았다. 결과적으로 위의 모든 열변형 오차 모델링 기법들로 평가된 예상치들이 모두 측정값과 비교적 매우 작은 편차들을 보였으며, 그 중에서도 시스템 검증 모델이 열변형 오차와 온도의 모델링에서 가장 낮은 제곱근 평균값을 보였다.

열변형 오차 모델링의 효과를 검증하기 위해 열변형 오차의 예상치를 계산하여 마이크로 컴퓨터와의 통신 네트워크를 통해 CNC 공작기계에 보정을 하였다. 열변형 보정 전과 후의 스피들 변형량을 5 개의 갠센서에서 측정한 결과를 Fig. 9 에 나타내었다. Fig. 9 에서 알 수 있듯이 스피들의 열변형량이 크게 줄어들었다. Z 축 방향 오차는 최대 55  $\mu\text{m}$ (w/o S5)에서 2  $\mu\text{m}$ (w/c S5)로, Y 축 방향 오차는 최대 -48  $\mu\text{m}$ (w/o S2)에서 3  $\mu\text{m}$ (w/c S2)로 크게 줄

어 들었다. 열변형 오차의 효과가 검증되었으며, 실제로도 스피들의 열변형 오차가 크게 줄어들었다.

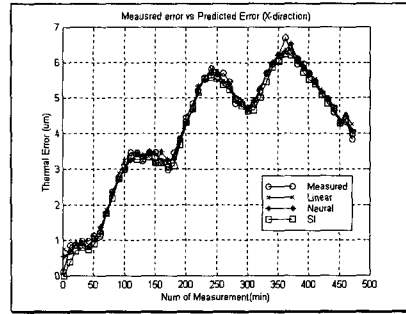


Fig. 8 (a) X Thermal X radial error

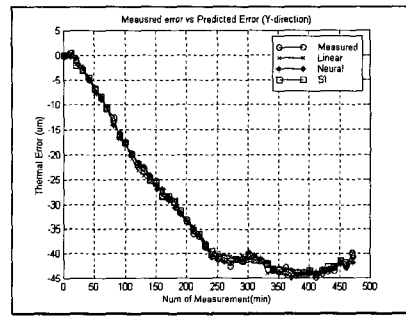


Fig. 8 (b) Thermal Y radial error

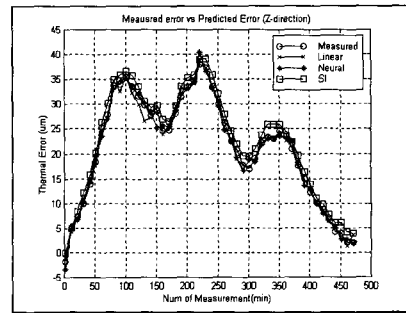


Fig. 8 (c) Thermal Z axial error

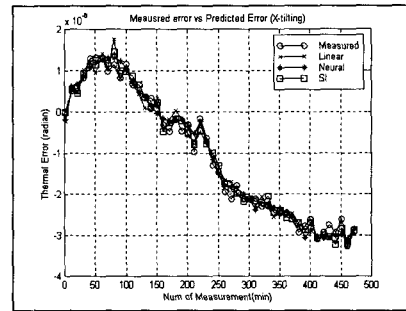


Fig. 8 (d) Thermal X tilting error

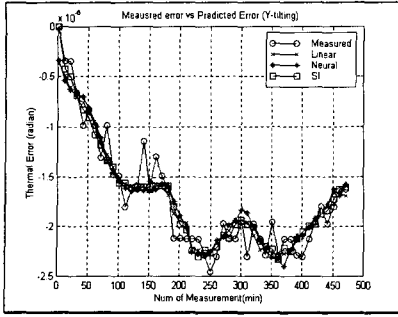


Fig. 8 (e) Thermal Y tilting error

Table 1 The comparison of simulation results in each models

Model		Root mean square error
Multiple regression model	X axis	0.156 $\mu\text{m}$
	Y axis	0.802 $\mu\text{m}$
	Z axis	1.030 $\mu\text{m}$
	$\alpha$ tilt	1.492e-7 arcsec
	$\beta$ tilt	1.986e-7 arcsec
Neural network model	X axis	0.189 $\mu\text{m}$
	Y axis	0.733 $\mu\text{m}$
	Z axis	0.976 $\mu\text{m}$
	$\alpha$ tilt	1.521e-7 arcsec
	$\beta$ tilt	2.147e-7 arcsec
System identification model	X axis	0.152 $\mu\text{m}$
	Y axis	0.493 $\mu\text{m}$
	Z axis	0.547 $\mu\text{m}$
	$\alpha$ tilt	1.416e-7 arcsec
	$\beta$ tilt	1.635e-7 arcsec

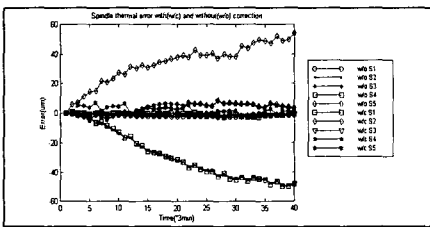


Fig. 9 Spindle thermal drift comparison with/without correction

### 5. 결론

본 논문에서는 열변형 오차의 측정 및 모델링 기법을 고안하여 CNC 공작기계의 스피들 5 자유도 열변형에 직접 적용하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) CNC 머신 스피들의 5 자유도의 오차 성분들을 측정하기 위하여 깎 센서와 열전대를 사용하여

고 이들 측정값들을 이용하여 오차값을 계산하는 알고리즘을 마이크로 컴퓨터에 프로그램하였다.

(2) 스피들의 5 자유도의 오차 성분들을 측정하기 위하여, 일반적인 가동조건을 모두 포함하기 위하여 공작 기계의 전형적인 세가지 가동 조건을 제안하였다: 일정한 회전속도 가동 조건, 주기적 회전 속도 가동 조건, 임의 회전 속도 가동 조건. 이렇게 다양한 가동 조건은 효율적이고 진실한 열변형 오차 측정 자료를 얻기 위함이다.

(3) 열변형 오차 모델링의 세가지 기법인 다중 선형 회기(multiple linear regression), 신경 회로망(neural network), 시스템 검증법(system identification method)을 스피들의 5 자유도 오차에 대해 적용하였다. 각각의 모델링은 충분히 설명되었고 선정된 모델링은 실제의 CNC 공작기계에 적용하여 이를 비교하였다. 결과적으로, 열변형 오차 모델링에 의해 추정된 오차량과 측정된 오차량은 매우 근접하였고 선정된 모델 중 시스템 검증 모델이 최소의 편차를 가졌다.

(4) 열변형 오차의 정확하고 효율적인 측정을 위하여 온라인 자동 측정 시스템을 개발하여 컴퓨터가 측정의 전과정을 제어할 수 있게 하였다. 물론 여기에는 통신 네트워크를 통한 CNC 공작기계의 제어도 포함하여 무인 자동 측정 시스템을 개발하였다.

(5) 개발된 열변형 오차 측정/모델링 시스템을 실제적으로 CNC 공작기계에 적용시켰고, 스피들의 열변형 오차를 마이크로 컴퓨터와 공작기계간의 통신 네트워크를 통해 효율적으로 보정하였다. 보정 시스템을 이용하여 공작기계의 정밀도를 크게 향상시킬 수 있었으며, 스피들 5 자유도 열변형 오차를 위한 기술의 효과와 중요성을 입증하였다.

(6) 스피들 열변형 오차 실험의 관측을 통하여 몇몇 전통적인 설계 원칙을 확인할 수 있었다. 실제적으로 스피들 하우징의 대칭구조가 칼럼 타입 공작기계에서는 Z 축 방향과 Y 축 방향의 스피들 열변형 오차가 비슷하게 나타났고, X 축 방향의 열변형 오차는 비대칭인 Y 축, Z 축 방향보다 작아서 약 1/5 정도로 나타났다. 하지만 틸트오차인 경우는 열변형 오차가 X 축이나, Y 축이 비슷한 정도로 나타났다.

### 참고문헌

(1) Bryan, J., 1968, "International Status of Thermal Error Research(Keynote)," *Annals of CIRP*, Vol.16, pp.



- 203~215.
- (2) Narayan Srinivasa, John C.Ziegert,1996, "Automated Measurement and Compensation of Thermally Induced Error Maps in Machine Tools," *Precision engineering*, Vol.19, pp. 112~132.
- (3) CHEN, J. S., 1995, "Computer Aided Accuracy Enhancement for Multi Axis CNC Machine Tool," *Int. J. Mach. Tools Manufact.* Vol. 35, No.4 pp. 593~605.
- (4) Yule, G.U., "On a Method of Investigating Periodicities in Disturbed Series, with Special Reference to Wolfer's Sunspot Numbers," *Phil. Trans.*, A-226, p. 267.
- (5) PANDIT, S. M., WU, S. M., 1983, "Time series and system analysis with applications," *John Wiley and Sons.*
- (6) ANSI Standard B89.3.4M-1985, *American Society of Mechanical Engineerings, United Engineering Center, 345 East 47<sup>th</sup> St., New York, NY 10017.*
- (7) Francis S.Tse and Ivan E.Morse, 1989, "Measuerment and Instrumentation in Engineering: Principles and Basic Laboratory Experiments," MARCEL DEKKER,INC.