한국정밀공학회지 제 19 권 제 5 호 (2002 년 5 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 19, No. 5, May 2002.

◆특집◆ 공작기계의 열변형

공작기계의 열변형 오차 모델링 기법

이재종*

Modeling Methods for Thermal Errors of Machine Tool

Jae Jong Lee*

Key Words : Thermal error(열변형오차), On-machine measurement(기상측정), Regression analysis(회귀분석법), Neural network(신경회로망), Homogeneous transformation matrix (동차변환행렬)

1. 서론

기계가공에 있어서 기본설비인 CNC 공작기계는 가공정도의 향상, 생산시간의 단축, 생산단가의 감소 및 제품의 고품질화를 실현하기 위해서 다양한 형태의 성능개선이 요구되고 있다. 초기에 개발된 공작기계는 단순한 자동화의 관점에서 자동 팔렛 교환장치, 자동 공구교환장치, 공구 메가진 등이 사용되었으나 점차 공작기계의 무인화 운전의 필요성이 증가함에 따라 절삭공구의 이상감시/진단, 공작기계의 이상감시/진단 기능 및 절삭상태 감시/진단 기능 등이 부가된 지능화 공작기계와 고정도/고품질의 제품가공이 가능한 공작기계가 요구되고 있다. 특히, 고정도 및 고품질을 가진 제품을 가공하기 위해서는 제품의 품질 및 정밀도에 직접적인 영향을 미치는 공작기계가 가지고 있는 기하오차와 절삭가공 중에 발생하는 진동, 열, 절삭력에 의해 발생하는 오차를 신속하게 측정하여 보정해야 한다. 공작기계에서 발생하는 오차는 오차의 형태에 따라 정적오차(quasi-static error)와 동적오차(dynamic error)로 구분한다. 동적오차는 기계의 진동, 채터(chatter) 및 스핀들 유니트의 진동에 의해서 발생하는 오차이고, 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 온도변화에 의해서 발생하는 열변형 오차(thermal error or thermally induced error)로 구분한다. 정적오차는 공작기계의 구조계, 이송계, 주축계의 변형을 유발시킴으로써 공작기계의 가공정도에 직접적인 영향을 미쳐 가공정도를 저하시킨다[1,3-5]. 특히, 절삭가공 중에 발생하는 이송축, 스핀들 유니트, 모터 등의 열원에 의해서 나타나는 열변형 오차는 공작기계의 기하오차에 비해서 가공정도에 큰 영향을 미치며, 공작기계에서 발생하는 오차의 40~70%는 열변형 오차에 의해서 발생한다[1,3]. 또한, 절삭가공 중에 발생하는 다양한 열원에 의해서 시시각각으로 변하기 때문에 고정도 가공을 위해서는 열변형 오차를 최소화시켜야 한다.

열변형 오차와 관련된 연구는 크게 공작기계 구조설계 관점에서 다양한 형태의 발생열을 최소화하여 가공정도를 높이기 위한 연구와 열변형 오차의 모델링 및 측정을 통하여 보정하는 연구가 주로 이루어지고 있다. 그러나, 열변형 오차는 최

* 한국기계연구원 지능형 정밀기계 연구부
Tel. 042-868-7145, Fax. 042-868-7149
Email jjlee@kimm.re.kr
나노 메카트로닉스, 가공시스템의 지능화 및 공작기계 열변형 해석/보정시스템 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

적설계를 하더라도 피할 수 없기 때문에 측정하여 보정하는 연구가 반드시 필요하다[1,5-7]. 이외에 온도변화에 따른 열변형 오차를 신속하게 예측하여 보정하기 위한 방법으로 회기분석법과 신경회로망을 이용하여 온도와 변위와의 관계 모델을 이용한 오차예측에 관한 연구도 진행되고 있다. 그러나, 공작기계의 정적오차는 X, Y, Z 축 방향의 3 차원 공간상에서 다르게 나타나고, 특히, 열변형 오차는 비선형 특성을 가지고 있으며, 시간에 따라 지배적인 영향을 받기 때문에 정확한 오차측정 및 오차보정을 위해서는 작업 중에 신속한 오차를 측정해야 한다.

이러한 관점에서 본 논문에서는 공작기계의 열변형 오차에 대한 모델링방법을 기술하고, 접촉식프로브를 이용하여 기상(on-machine)계측 방법으로 공작기계의 열변형 오차를 신속하게 측정할 수 있는 시스템을 이용하여 작업 공간상에서 존재하는 열변형 오차를 측정/해석하는 방법에 대해서 기술하고자 한다.

2. 회귀분석법에 의한 모델링

공작기계의 열변형 오차를 측정 또는 예측하기 위한 오차모델링 방법으로는 동차변환행렬을 기반으로 하는 형상창성함수 방법과 동차변화행렬에 포함되는 위치오차, 각변위오차를 시간에 따른 함수로 두고 모델링하는 방법 등이 있고, 발생온도와 그에 따른 측정변위를 이용하여 온도변화에 따른 열변형 오차를 예측하기 위한 모델링 방법으로는 회귀분석법(regression analysis), 신경회로망(neural network)의 방법이 있다.

회귀분석법은 온도와 변위들간의 관련성을 규명하기 위해서 어떤 수학적 모형을 가정하고, 미모형을 측정된 변수를 이용하여 추정하는 통계적 방법이다. 즉, 기계상의 임의의 점에서의 온도와 변위사이의 관계를 다음 식(1)과 같이 1 차함수의 관계를 갖는다고 가정하여 모델링한 후 모델에 포함되는 미지수를 최소제곱법을 사용하여 구함으로써 공작기계의 온도변화에 따른 열변형 오차를 추정할 수 있는 방법이다.

$$Y_i = A_i + B_{1i}\Delta T_{i1} + B_{2i}\Delta T_{2i} + \cdots + B_{ki}\Delta T_{ki} \quad (1)$$

3. 신경회로망에 의한 모델링

신경회로망방법은 열변형 오차와 같이 비선형 특성을 가지는 경우 입력변수에 따른 출력값을 예측하기 위해사용 되는 방법이다. 가장 간단한 신경회로망 모델의 노드는 n개의 입력을 받아 n개의 연결강도의 벡터들과 곱해져서 특정한 출력함수(transfer function)를 출력시킨다. 노드는 내부적인 임계값(threshold value)이나 옵셋값 θ와 비선형함수에 따라서 달라진다. 본 논문에서는 델타규칙(generalized delta rule)을 이용하여 공작기계의 발생온도에 따른 열변형 오차를 예측하는 모델에 대해서 기술하고자 한다.

신경회로망 모델은 각 노드(node)간의 연결강도 w_{ij}, w_{jk} 는 각 노드간의 에너지함수 J 가 최소가 되도록 반복적으로 수정한다.

에너지함수 J 는 다음과 같이 입력패턴으로부터 얻어지는 출력값과 목표값의 차의 제곱의 총합형태로 표현된다.

$$J(w) = \frac{1}{2}\sum_{p}\sum_{k}(t_k - o_k)^2 = \frac{1}{2}\sum_{p}\sum_{k}(t_k - f(\sum w_{jk}o_j))^2 \quad (2)$$

여기서, p 는 입력층의 패턴번호, o_j 는 j 노드의 출력값이고, t_k 는 목표값, o_k 는 입력패턴에서 얻어지는 실제 출력값, f 는 비선형적 함수인 시그모이드 함수이다. 이러한 관계와 학습오차의 진동을 줄이고, 수렴속도를 빠르게 하기 위해 모멘텀 항(mometum term)을 고려하면 연결강도의 변화량은 다음과 같고, 이 변화량만큼 연결강도를 변화시키면 에너지함수 J 는 감소하게 된다.

$$\Delta w_{ij}(t+1) = -\eta\frac{\partial J}{\partial w_{ij}} + \alpha\Delta w_{ij}(t) \quad (3)$$

$$\Delta w_{jk}(t+1) = -\eta\frac{\partial J}{\partial w_{jk}} + \alpha\Delta w_{jk}(t) \quad (4)$$

여기서, η는 학습율(learning rate)이고, α는 모멘텀율(momentum rate)이다. 따라서, η, α를 조정하여 학습시켜 에너지가 최소가 되는 각 노드의 연결강도를 구함으로써 입력 온도패턴에 따른 열변형 오차를 추정할 수 있다.

신경회로망 모델은 학습조건에 따라 모델의 신뢰성이 좌우되기 때문에 공작기계의 특성에 맞도록 측정결과로부터 공작기계의 온도특성을 대표할 수 있는 스핀들 유니트 및 주위, 공작기계의 칼럼, X, Y, Z축의 대표 온도점을 선정해야 한다. 따라서, 구성된 신경회로망 모델에서 입력층은 앞

에서 선정한 8점의 대표 온도점이 입력되고, 출력층은 X, Y, Z방향의 열변형 오차(scalar thermal error)를 출력시킴으로써 열변형 오차 예측이 가능하다.

4. 형상창성함수에 의한 모델링

4.1 오차모델링

공작기계 및 공작기계 주위의 온도변화에 의해 발생하는 열변형 오차는 비선형의 특성을 가지고 있고, 스핀들 유니트, 볼 스크류, 칼럼 등 공작기계 구성요소의 서로 다른 온도특성에 의해 영향을 받기 때문에 정량적인 해석이 어렵다. A.K.Srivastava[7]는 공작기계의 위치오차와 각변위 오차가 시간에 따라서 지수형태로 변하고, 위치에 따라서는 선형에 가깝다는 가정을 이용하여 열변형 오차를 수학적으로 모델링을 했으나 오차모델의 변수를 구하기 위해서 상당히 많은 측정값이 필요하게 된다. 본 논문에서는 동차변환행렬을 이용한 형상창성함수를 이용한 열변형 오차 모델링방법에 대해서 기술하고자 한다.

D.N. Reshetov[2]에 의해서 제안된 형상창성 함수는 공작기계의 형상창성운동과 가공형상의 관계를 수학적으로 해석한 것으로, 공작물에 대한 공구의 궤적은 공작기계를 구성하고 있는 주축 스핀들 유니트, 베드(bed), 테이블(table), 칼럼 의 상대운동의 중첩으로 형성된다는 개념을 이용하여 공작기계의 운동특성과 가공형상과의 관계를 수학적으로 모델링 할 수 있으며, 절삭공구로 연결되는 강체의 링크구조로 가정하여 공작기계의 운동특성을 인접한 강체간의 상대운동의 중첩으로 표현할 수 있다.

따라서, 공작기계의 열변형 오차를 기계상에서 측정/해석하기 위해서 공작기계의 스핀들 유니트, 칼럼 및 볼 스크류의 열원이 발생했을 때 구 측정구에서 측정된 칼럼의 각변위 오차와 스핀들 유니트의 온도변화에 의한 오차(drift error)를 이용하여 공작기계의 열변형 오차를 모델링할 수 있다.

공작기계의 열변형 오차는 스핀들 유니트의 열변형 오차 $\delta_{spindle}$, 칼럼의 열변형 오차 δ_{column} 및 볼 스크류의 열변형 오차 δ_{screw} 에 의해서 영향을 받고, 각각의 오차는 공간상의 위치에 따라서 다르기 때문에 열변형 오차는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta_{th} = f(\delta_{spindle}(x,y,z), \delta_{column}(x,y,z), \delta_{screw}(x,y,z)) \quad (5)$$

공작기계의 볼 스크류 열변형 오차는 공작기계 구동부의 반복적인 이송에 의해 발생하는 볼 스크류의 축과 너트의 마찰열에 의해서 주로 발생한다. 수평형 머시닝센터의 칼럼은 좌우대칭 구조를 가지고 있고, 머시닝센터의 구조적인 영향으로 스핀들 유니트의 열원이 발생했을 때 칼럼은 열원의 열전도에 의해서 Fig.1 과 같이 XY, YZ, XZ 평면상에서 각변위 형태로 나타나고, 이런 각변위는 공간상에서 칼럼의 위치에 따라서 다르게 나타난다. 또, 스핀들 유니트의 열변형 오차는 스핀들 유니트의 축 방향으로 진행된다.

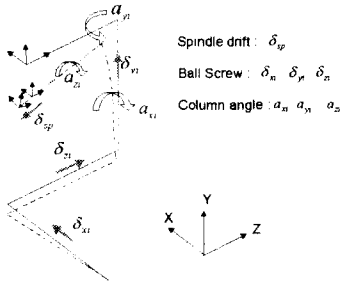

Fig.1 Deformation pattern of the horizontal machining center

따라서, 공간상의 임의의 점 x_i, y_i, z_i 에서 칼럼이 YZ, XZ, XY 평면으로 각각 a_{xi}, a_{yi}, a_{zi} 만큼의 각변위 오차가 존재하고, 볼 스크류의 열변형 오차 $\delta_{xi}, \delta_{yi}, \delta_{zi}$, 스핀들 유니트의 온도변화에 의한 오차(spindle drift) δ_{sp} 가 발생하면, 형상창성함수의 동차변환행렬 A_i^{i+1} 를 이용하여 공작기계 구조물의 실제 위치벡터 P_{actual} 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{actual} &= A_0^1 \cdot A_1^2 \cdot \ldots \cdot A_{n-1}^n P_{ref} \\ &= A^3(\delta_{sp}) A^3(-L) A^6(a_{zi}) A^5(a_{yi}) A^4(a_{xi}) A^2(y_i + \delta_{yi}) \\ &\quad A^3(z_i + \delta_{zi}) A^1(x_i + \delta_{xi}) P_{ref} \\ &= [T] P_{ref} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, $P_{ref} = [x \; y \; z - L \; 1]^T$ 는 열원이 없을 때의 위치벡터이고, A^i 는 동차변환행렬이다. 또, $A^i(q)$ 에서 i=1~6 이며, i=1~3 은 X,Y,Z 축에 대한 병진운동을 의미하고, i=4~6 은 X,Y,Z 축에 대한 회전운동을 의미한다. 여기서 q 는 각각의 운동에 대한 운동값을 의미한다. 이러한 관계로부터 열원이 발생했을 때의 공간상의 열변형 오차 ΔP 는 다음

과 같다.

$$\Delta P = P_{actual} - p_{ref} = [T]P_{ref} - P_{ref} = [\delta_{thx} \quad \delta_{thy} \quad \delta_{thz} \quad 1]^T \tag{7}$$

여기서,각 축의 각변위 오차가 미소하다고 가정하고, 2 차 이상의 항을 무시하면, $\cos\theta \approx 1$, $\sin\theta \approx \theta$이고, $[T]P_{ref}$ 는 다음과 같다.

$$[T]P_{ref} = \begin{bmatrix} 1 & -a_{zi} & a_{yi} & x_i + \delta_{xi} + (z_i + \delta_{zi})a_{yi} - (y_i + \delta_{yi})a_{zi} \\ a_{zi} & 1 & -a_{xi} & (x_i + \delta_{xi})a_{zi} + y_i + \delta_{yi} - (z_i + \delta_{zi})a_{xi} \\ -a_{yi} & a_{xi} & 1 & z_i + \delta_{zi} + \delta_{sp} + L - (x_i + \delta_{xi})a_{yi} + (y_i + \delta_{yi})a_{xi} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{8}$$

따라서, 공작기계 열변형오차 $\delta_{thx}, \delta_{thy}, \delta_{thz}$ 는 $\Delta P = [T - I]P_{ref}$ 로 부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta_{thx} &= \delta_{xi} + (z_i + \delta_{zi})a_{yi} - (y_i + \delta_{yi})a_{zi} \\ \delta_{thy} &= (x_i + \delta_{xi})a_{zi} + \delta_{yi} - (z_i + \delta_{zi})a_{xi} \\ \delta_{thz} &= \delta_{zi} + \delta_{sp} - (x_i + \delta_{xi})a_{yi} + (y_i + \delta_{yi})a_{xi} \end{aligned} \tag{9}$$

여기서, x_i, y_i, z_i 는 임의의 공간상의 좌표값이고, a_{xi}, a_{yi}, a_{zi} 는 칼럼의 각변위 오차, $\delta_{xi}, \delta_{yi}, \delta_{zi}$ 는 볼 스크류의 열변형 오차, δ_{sp} 는 온도변화에 의한 스핀들 유니트의 열변형 오차이다. 따라서, 칼럼의 각변위 오차, 스핀들 유니트의 열변형 오차 및 이송축의 열변형 오차를 측정하면 공간상의 열변형 오차를 측정/해석할 수 있다.

4.2 칼럼, 스핀들 및 이송축의 열변형 오차

칼럼의 각변위는 측정침의 자체변형이 거의 없는 프로브의 측정침(stylus)을 상호 직교축이 되도록 구성한 십자형 프로브(star type probe)를 이용하여 측정하고, 공작기계의 작업 공간상에 설치된 구 측정구를 측정함으로써 온도변화에 따른 칼럼의 열변형 오차와 스핀들 유니트의 열변형 오차를 측정한다. 하나의 측정침을 사용하는 경우 임의의 한 점에서의 위치좌표 만을 측정할 수 있는데 비해서 십자형 프로브는 측정침의 자체변형이 거의 없기 때문에 각 측정침의 측정값을 이용하여 프로브의 틀어진 각도와 위치좌표를 측정할 수 있다.

온도변화가 발생하기 전후의 십자형 프로브의 형태는 Fig.2 와 같이 P_0, P_1, P_2에서 P_0', P_1', P_2' 의 위치로 변하고, 십자형 프로브의 자체의 변형이 없기 때문에 강체의 동차변환행렬과 프로브 측정침의 3 점의 측정좌표를 이용하여 공작기계 칼럼의 각변위 오차와 스핀들 유니트의 열변형 오차를 측정할 수 있다. 온도변화에 의해서 십자형 프로브가 X, Y, Z 축에 대해서 각각 a_{xi}, a_{yi}, a_{zi} 의 각변위가 발생했을 때 프로브의 변환된 위치는 강체의 동차변환행렬을 이용하여 다음과 같이 표현된다.

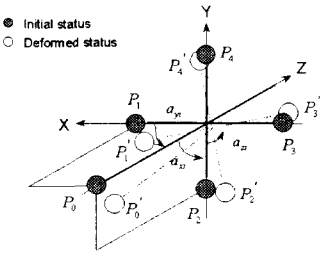

Fig. 2 Configuration of the star type probe

$$P_{new} = TR.P_{old} \tag{10}$$

여기서, TR은 X, Y, Z 축의 각변위에 의한 동차변환행렬의 곱이며, P_{new} 는 온도변화가 발생한 후 프로브의 위치좌표이고, P_{old} 는 온도변화가 발생하기 전 프로브의 위치좌표이다.

$$TR = A^4(a_{xi}).A^5(a_{yi}).A^6(a_{zi}) \tag{11}$$

$$P_{new} = \begin{bmatrix} x_{n0} & x_{n1} & x_{n2} \\ y_{n0} & y_{n1} & y_{n2} \\ z_{n0} & z_{n1} & z_{n2} \end{bmatrix} \qquad P_{old} = \begin{bmatrix} x_{o0} & x_{o1} & x_{o2} \\ y_{o0} & y_{o1} & y_{o2} \\ z_{o0} & z_{o1} & z_{o2} \end{bmatrix}$$

여기서, x_{oi}, y_{oi}, z_{oi} (i =0..2)는 온도변화가 발생하기 전에 구 측정구를 측정했을 때 프로브 측정침의 측정값이고, x_{ni}, y_{ni}, z_{ni} (i =0..2)는 온도변화가 발생한 후에 구 측정구를 측정했을 때 프로브 측정침의 측정값이다.

식(6)에 동차변환행렬과 온도변화가 발생하기 전후의 위치좌표행렬을 대입하여 정리하면 다음 식(8)과 같고,

$$\begin{bmatrix} x_{n0} & x_{n1} & x_{n2} \\ y_{n0} & y_{n1} & y_{n2} \\ z_{n0} & z_{n1} & z_{n2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{o0} - y_{o0}a_{zi} + z_{o0}a_{yi} & x_{o1} - y_{o1}a_{zi} + z_{o1}a_{yi} & x_{o2} - y_{o2}a_{zi} + z_{o2}a_{yi} \\ -z_{o0}a_{xi} + x_{o0}a_{zi} + y_{o0} & -z_{o1}a_{xi} + x_{o1}a_{zi} + y_{o1} & -z_{o2}a_{xi} + x_{o2}a_{zi} + y_{o2} \\ z_{o0} + y_{o0}a_{xi} - x_{o0}a_{yi} & z_{o1} + y_{o1}a_{xi} - x_{o1}a_{yi} & z_{o2} + y_{o2}a_{xi} - x_{o2}a_{yi} \end{bmatrix} \tag{12}$$

이 식으로부터 x_{ni}, y_{ni}, z_{ni} 는 측정값이므로, 행렬내의 각각의 9 개의 식으로부터 미지수인 임의의 공간상에서의 칼럼의 각변위 a_{xi}, a_{yi}, a_{zi} 를 구할 수 있다. 여기서, x_{oi} , y_{oi} , z_{oi} , x_{ni} ,

y_{ni}, z_{ni} 는 각 측정구의 위치에서 측정된 측정침의 위치좌표이다.

$$a_{xi} = -\left.\frac{(y_{o2}-y_{n2})x_{o0}-(y_{o0}-y_{n0})x_{o2}}{x_{o2}z_{o0}-x_{o0}z_{o2}}\right|_{i=1\sim4}$$
$$a_{yi} = -\left.\frac{(x_{o0}-x_{n0})y_{o1}-(x_{o1}-x_{n1})y_{o0}}{y_{o1}z_{o0}-y_{o0}z_{o1}}\right|_{i=1\sim4} \quad (13)$$
$$a_{zi} = \frac{x_{o1}-x_{n1}}{y_{o1}} - \left.\frac{[(x_{o1}-x_{n1})y_{o2}-(x_{o2}-x_{n2})y_{o1}]z_{o1}}{y_{o1}(y_{o2}z_{o1}-y_{o1}z_{o2})}\right|_{i=1\sim4}$$

또, 스핀들 유니트의 온도변화에 의한 오차 δ_{sp} 는 측정구가 구(spherical ball)이기 때문에 구 중심좌표의 변화를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta_{sp} = |P_{real} - P_{ref}| = \sqrt{(x_{n0}-x_{o0})^2+(y_{n0}-y_{o0})^2+(z_{n0}-z_{o0})^2} \quad (14)$$

이송축인 볼 스크류의 열변형 오차는 측정된 칼럼 및 스핀들 유니트의 열변형 오차에 대한 역상값(mirror image value)을 이용한 방법을 적용하여 오차해석을 했다. 역상값을 이용한 방법은 십자형 프로브로 측정된 칼럼의 각변위 오차와 스핀들 유니트의 열변형오차의 역상값을 열변형 오차 모델식에 적용함으로써 이송축에 의한 열변형 오차를 해석할 수 있다. 즉, 식(9)에 구 측정구의 각 구에서 측정침 P_0에 의해 측정된 측정값과 3 차원 측정기의 측정값의 차 $\delta_{thxi}, \delta_{thyi}, \delta_{thzi}$ 와 역상값을 적용하면 다음과 같다.

$$(a_{xi}, a_{yi}, a_{zi}, \delta_{sp}) \Rightarrow (-a_{xi}, -a_{yi}, -a_{zi}, -\delta_{sp})$$
$$\begin{bmatrix} \delta_{thxi}-y_i a_{zi}+z_i a_{yi} \\ \delta_{thyi}+x_i a_{zi}-z_i a_{xi} \\ \delta_{thzi}+\delta_{sp}-x_i a_{yi}+y_i a_{xi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & a_{zi} & -a_{yi} \\ -a_{zi} & 1 & a_{xi} \\ a_{yi} & -a_{xi} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{xi} \\ \delta_{yi} \\ \delta_{zi} \end{bmatrix} \quad (15)$$

이로부터 이송축의 열변형 오차 d 는 다음과 같다.

$$D = A.d \quad \therefore d = A^{-1}.D \quad (16)$$

따라서, 구를 사용한 측정구와 십자형 프로브 (star type probe : L=60mm, d=6mm)를 이용하여 온도변화가 발생한 임의의 시간 t 에서 측정된 칼럼의 각변위 오차, 스핀들 유니트 및 이송축의 열변형 오차를 측정하여 식(9)에 대입함으로써 온도변화에 따른 공간상의 열변형 오차를 측정/해석할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 공작기계의 열변형과 관련하여 열변형 오차의 모델링방법으로 회귀분석법, 신경회로망법 및 동차변화행렬을 기반으로 하는 형상창성함수와 기상계측방법을 이용한 열변형 오차모델링 방법에 대해서 기술했다. 공작기계에 있어서 열변형 오차는 시간에 따라 비선형적으로 변화하는 특성을 가지고 있기 때문에 다양한 작업조건과 작업환경에 따라 직접적인 영향을 받는다. 따라서, 발생온도에 따른 열변형 오차를 모델링 한 후 실시간적으로 변화하는 열변형 오차를 측정 또는 예측하여 오차를 최소화할 수 있는 오차보정 방법이 반드시 필요하다. 최근 이러한 열변형 오차를 보정하기 위한 방법으로 공작기계 제어기와 연계한 전용 열변형오차 보정장치가 연구되고 있다.

참고문헌

1. J.Bryan, "International Status of Thermal Error Research," Annals of CIRP, Vol. 39, No. 2, pp. 645-656, 1990.
2. Reshetov, D.N., et al, Accuracy of Machine Tools, NewYork, ASME Press, 1988.
3. J.S. Chen, et al, "Thermal Error Modeling for Volumetric Error Compensation," Sensors and Signal Processing for Manufacturing, PED-Vol. 55, ASME, 1992.
4. M.Yang, J. Lee, "Measurement and Prediction of thermal Error of a CNC Machining Center using Two Spherical Balls," J. of Mat. Proc. Tech., Vol. 75, No. 1-3. , 1998.
5. J. LEE, M. YANG, "Modeling and Measurement of Volumetric Thermal Errors for CNC Machining Center using On-the-Machine Measurement System," X Workshop on Supervision and Diagnostics of Machining system, 1999.
6. W.Knapp, E. Matias, "Test of the Three-Dimensional Uncertainty of Machine Tools and Measuring Machines and its Relation to the Machine Errors," Annals of CIRP, Vol. 32, No. 1, pp. 459-464, 1983.

7. J. Mou, C.R. Liu, "A Methodology for Machine Tools Error Correction using Reference Parts," Int. J. of Comp. Int. Manufact., Vol. 8, No. 1, pp. 229-233, 1995.
8. A.K.Srivastava, et al, "Modeling Geometric and Thermal Errors in a Five-Axis CNC Machine Tool," Int. J. of Mach. Tools Manufact., Vol. 35, No. 9, pp. 1321-1337.