

작업조건에 따른 공작기계의 열변형 특성 해석 및 보정

이재종*, 최대봉*, 박현구**, 곽성조**

Characteristics Analysis and Compensation of Thermal Deformation for Machine Tools with respect to Operating Conditions

JaeJong Lee*, DaeBong Choi*, HyunKoo Park**, SungJo Kwak**

Abstract

In metal cutting, the machining accuracy is more affected by thermal errors than by geometric errors. This paper models of the thermal errors for error analysis and develops on-the-machine measurement system by which the volumetric error are measured and compensated. The thermal error is modeled by means of angularity errors of a column and thermal drift error of the spindle unit which are measured by the touch probe unit with a star type styluses, a designed spherical ball artifact, and five gap sensors. In order to analyze the thermal characteristics under several operating conditions, experiments performed with the touch probe unit and five gap sensors on the vertical and horizontal machining centers.

Key Words : thermal error(열변형 오차), geometric error(기하오차), touch probe(접촉식프로브), gap sensor(갭센서), error compensation(오차보정), neural network(신경회로망)

1. 서론

공작기계의 가공정도는 공작기계를 구성하고 있는 각 구성요소의 기하학적인 상태에 의해서 발생하는 기하오차와 가공 중에 발생하는 절삭열과 스피들의 고속회전에 의한 발열과 이송축의 반복적인 이송에 의해서 발생하는 마찰열 및 주위온도 변화에 의한 열변형 오차에 의해서 직접적인 영향을 받는다. 일반적으로 열변형 오차는 공작기계의 기

하오차에 비해서 가공정도에 큰 영향을 미치며, 공작기계에 서 발생하는 오차의 40~70%는 열변형 오차에 의해서 발생한다.⁽⁴⁾ 이러한 현상은 공작기계의 기하오차는 조립한 후에 품질관리와 위치오차의 보정(compensation)을 통해서 설계단계의 정도를 유지하지만 발생 열에 의한 열변형 오차는 작업조건과 가공특성에 따라서 발생하는 열원에 의해서 복잡한 형태로 발생하여 오차 보정이 곤란하기 때문이다. 따라서, 가공정도를 향상시키기 위해서는 작업 중에 발

* 한국기계연구원(이재종: jjlee@kimm.re.kr)
** 충남대 기계공학과 대학원

생하는 복잡한 열변형 오차를 최소화시켜야 한다. 이러한 열변형 오차를 최소화시키기 위한 방법으로 Spur는 공작기계 설계관점에서 열원냉각방법, 열변형이 없는 재질이나 열전도도가 낮은 재질을 사용하는 방법과 발생하는 열변형 오차를 측정하여 보정하는 방법을 제시했다.⁽⁴⁾ 그러나 최적설계를 통해서 열변형 오차를 줄이는 데에 고가의 비용과 소재개발 등의 한계가 있기 때문에 열변형 오차를 최소화하기 위한 방법으로 측정을 통한 열변형 오차 보정방법이 연구되고 있으며⁽²³⁾, Z축 방향의 열변형 오차를 예측하여 보정하는 시스템이 개발되어 머시닝센터에 적용되고 있다.

이러한 관점에서 본 논문에서는 개발하고 있는 라인센터의 열변형 오차를 실시간적으로 보정하기 위한 방법으로 접촉식프로브(touch probe)와 갭 센서(gap sensor)를 사용하여 라인센터와 유사한 구조를 가지고 있는 수직형, 수평형 머시닝센터를 대상으로 열변형 오차의 특성을 측정/해석 했다. 또한, 제안된 측정 시스템을 이용하여 작업 중에 발생하는 열변형 오차를 해석할 수 있는 열변형 오차 모델을 제시했고, 제시된 오차모델을 이용하여 오차측정 실험을 수행했으며, 신경회로망 모델을 이용한 오차예측 모델을 구성하여 오차예측 실험을 수행했다. 향후 개발하고 있는 오차보정 장치와 오차예측 모델을 대상 공작기계에 적용하여 오차보정을 수행할 계획이다.

2. 열변형 오차측정 모델링

공작기계의 열변형 오차는 스피들 유니트, 칼럼 및 볼스크류의 오차가 공간상의 위치에 따라서 다르기 때문에 공작기계의 열원이 발생했을 때 측정된 칼럼의 각변위 오차와 스피들 유니트의 오차를 이용하여 공작기계의 열변형 오차를 모델링할 수 있다.

공간상의 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 $\delta_{xi}, \delta_{yi}, \delta_{zi}$ 스피들 유니트의 온도변화에 의한 오차(spindle drift) δ_{sp} 가 발생하면, 동차 변환행렬 A_i^{i+1} 를 이용하여 공작기계 구조물의 실제 위치 벡터 P_{actual} 은 다음과 같다.

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

여기서, $P_{ref} = [x \ y \ z \ L \ 1]^T$ 는 열원이 없을 때의 위치벡터이고, A^i 는 동차변환행렬이다. 이러한 관계로부터 열원이 발생했을 때의 공간상의 열변형 오차 ΔP 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta P &= P_{actual} - P_{ref} = [T] P_{ref} - P_{ref} \\ &= [\delta_{thx} \ \delta_{thy} \ \delta_{thz} \ 1]^T \end{aligned} \quad (2)$$

이러한 관계에서 각 축의 각변위 오차가 미소하다고 가정하면 공작기계 열변형오차 $\delta_{thx}, \delta_{thy}, \delta_{thz}$ 는 다음과 같이 모델링된다.

$$\begin{aligned} \delta_{thx} &= \delta_{xi} + (z_i + \delta_{zi})a_{yi} - (y_i + \delta_{yi})a_{zi} \\ \delta_{thy} &= (x_i + \delta_{xi})a_{zi} + \delta_{yi} - (z_i + \delta_{zi})a_{xi} \\ \delta_{thz} &= \delta_{zi} + \delta_{sp} - (x_i + \delta_{xi})a_{yi} + (y_i + \delta_{yi})a_{xi} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, 칼럼의 각변위는 십자형프로브를 사용하는 방법과 갭센서의 측정값을 이용하는 방법이 있으며, 본 논문에서는 갭센서 측정값을 이용했고, 칼럼의 각변위는 다음과 같이 산출했다.

$$a_{xi} = \frac{V_2(y) - V_1(y)}{L_z} \quad (4)$$

$$a_{yi} = \frac{V_2(x) - V_1(x)}{L_z} \quad (5)$$

여기서, $V_1(x), V_1(y)$ 는 X, Y축 방향의 측정값이고, L_z 는 동일 축방향에 설치된 갭 센서간의 거리를 나타낸다. 또, 스피들 유니트의 오차 δ_{sp} 는 발생온도에 의한 스피들 유니트의 Z축 방향의 갭센서 측정값에 의해서 산출했다.

이러한 측정값으로부터 이송축에 의한 열변형 오차는 십자형 프로브로 측정된 칼럼의 각변위 오차와 스피들 유니트의 열변형 오차의 역상값을 오차 측정모델식에 적용함으로써 해석할 수 있다.

$$\begin{aligned} (a_{xi}, a_{yi}, a_{zi}, \delta_{sp}) &\Rightarrow (-a_{xi}, -a_{yi}, -a_{zi}, -\delta_{sp}) \\ \begin{bmatrix} \delta_{thx} - y_i a_{zi} + z_i a_{yi} \\ \delta_{thy} + x_i a_{zi} - z_i a_{xi} \\ \delta_{thz} + \delta_{sp} - x_i a_{yi} + y_i a_{xi} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & a_{zi} & -a_{yi} \\ -a_{zi} & 1 & a_{xi} \\ a_{yi} & -a_{xi} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{xi} \\ \delta_{yi} \\ \delta_{zi} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

이로부터 이송축의 열변형 오차 δ_{axis} 는 다음과 같다.

$$T = A \cdot \delta_{axis} \quad \therefore \delta_{axis} = A^{-1} \cdot T \quad (7)$$

3. 열변형 오차 측정/해석 및 보정

3.1 측정장치의 구성

작업 중에 발생하는 다양한 작업조건에 의한 스핀들 유니트 및 모터의 열원, 반복적인 이송에 따른 볼스크류의 마찰열원과 주위온도 등의 변화에 의해서 머시닝센터의 열변형 오차가 발생한다. 이러한 열변형 오차의 특성은 구성하고 있는 머시닝센터의 구조에 의해서 다르게 발생한다.

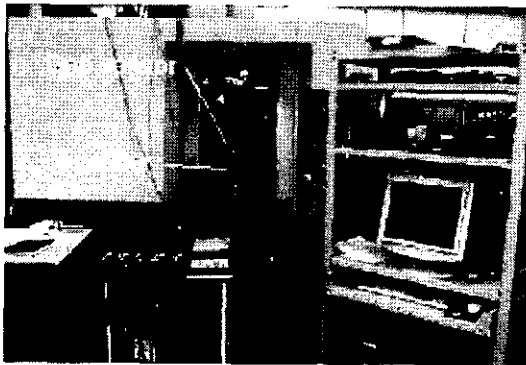


Fig. 1 Set-up the gap sensor and Invar test bar

본 논문에서는 일반적으로 머시닝센터의 열변형 오차가 주축회전에 의해서 지배적인 영향을 받기 때문에 주축회전과 이송조건에 따른 수평형과 수직형 구조의 머시닝센터 열변형 오차 특성을 평가하기 위하여 다양한 절삭조건을 사용했다.

측정실험은 수평형/수직형 머시닝센터의 열변형 오차와 공간상에서 발생하는 열변형 오차의 변화특성을 분석하고, 수평형/수직형 구조를 가지고 있는 머시닝센터의 열변형 특성을 해석하기 위해서 수행했다.

측정장치는 수평형과 수직형 공작기계의 열변형 특성을 신속하게 측정/분석하기 위해서 Fig. 1과 같이 갭센서와 인바재(Invar material)의 테스트 바를 사용하여 임의의 공간상의 한 점에서의 열변형 오차와 각변위를 측정하는 방

법과 공간상에서 발생하는 스핀들 유니트와 이송계의 열변형 특성을 측정하기 위해서 접촉식프로브를 사용하는 방법을 이용했다. 본 측정장치에서 사용한 인바(Invar)는 열팽창계수가 일반강의 약 1/10정도여서 주위온도변화에 의한 열변화 영향을 최소화할 수 있고, 접촉식프로브는 측정정도가 $1 \mu\text{m}(2\sigma)$ 이다.

3.2 측정결과 및 분석

열변형 오차 측정실험은 수직형과 수평형 머시닝센터의 열특성을 분석하기 위해서 작업조건과 공작기계의 세부 사양을 고려하여 Fig. 2와 Fig. 3과 같은 복합적인 작업조건을 사용하여 스핀들 유니트를 9시간 동안 회전시켜 열원을 발생시켰고, 매 10분 간격으로 발생온도와 스핀들 유니트의 열변형 오차를 측정했다. Fig. 4는 실험조건1을 사용했을 때 수직형과 수평형 머시닝센터에서 측정된 온도변화 특성이고, Fig. 5는 실험조건2에 의해서 측정된 수

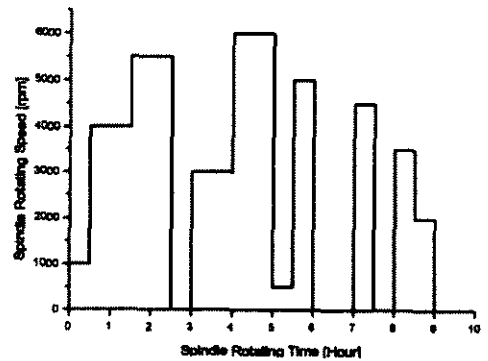


Fig. 2 Experimental condition No.1

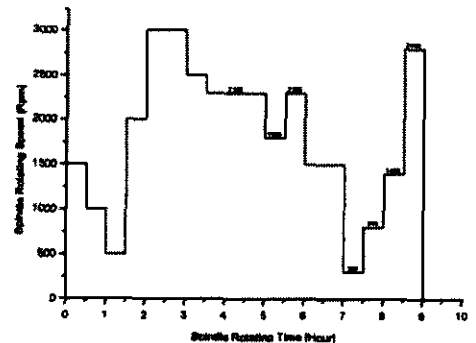


Fig. 3 Experimental condition No.2

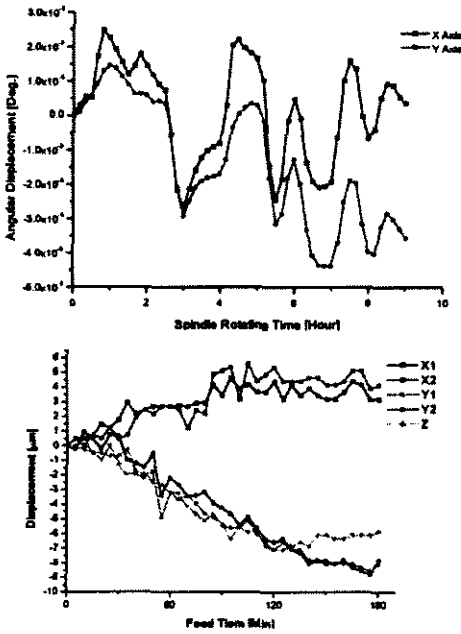


Fig. 7 Spindle slope and moving axis errors

Fig. 7은 식(4)와 (5)를 이용하여 측정된 발생열원에 의한 스피들 유니트의 기울어짐의 경향을 나타낸 것으로, C형 구조를 가지고 있는 수직형의 경우 구조물이 개방되는 방향(open direction)으로 변형되고, 수평형의 경우는 Fig.6의 결과로부터 열원에 의해서 닫히는 방향(closed direction)으로 변형되고 있음을 알 수 있다. 또한, 스피들 유니트의 회전수가 증가함에 따라 X축 방향의 열변형 오차는 공작기계의 대칭구조로 인해서 크게 나타나지 않고, Y, Z방향에서 비교적 크게 변하고 있는데 이는 발생열원에 의한 영향으로 스피들 유니트가 직접적인 영향을 받기 때문으로 판단된다.

특히, Y축 방향의 측정값이 크게 변화하고 있는데 이러한 결과는 수평형 머시닝센터의 구조상 스피들 유니트가 Y축의 볼 스크류에 의해서 지지되고 있어 발생열원이 Y축의 볼 스크류에 직접적인 영향을 미치지 때문이다.

3.3 열변형 오차 최소화 및 보정

열변형 오차를 최소화하는 방법은 설계적인 방법과 측정/보정방법이 있다[Spur, 1990]. 설계적인 관점은 열흐름(heat flow)을 줄이거나 온도차를 줄이기 위해서 열전도도와 열팽창계수가 낮은 재질을 사용하거나 대칭구조 설계

방법이 있다. 이러한 설계적인 방법을 사용하여 열변형 오차를 줄이기 위해서는 고가의 비용과 소재개발 등의 어려움이 있다. 이러한 관점에서 본 논문에서는 측정된 실험 결과를 기초로 온도변화에 따른 열변형 오차를 신속하게 보정하기 위한 방법으로 신경회로망 모델을 사용하여 오차예측 모델을 구성했다.

신경회로망 모델은 역전파 신경회로망을 사용했으며, 각 노드(node)간의 연결강도 W_{ij} , W_{jk} 는 각 노드간의 에너지함수 J 가 최소가 되도록 반복적으로 수정한다. 즉, 반복횟수 t 에서의 연결강도는 각 노드에서 아래와 같이 표현된다.

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) - \eta \frac{\partial J}{\partial w_{ij}} \quad (\eta : \text{learning rate}) \quad (8)$$

$$w_{jk}(t+1) = w_{jk}(t) - \eta \frac{\partial J}{\partial w_{jk}} \quad (9)$$

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

$$J(w) = \frac{1}{2} \sum_p \sum_k (t_k - o_k)^2 = \frac{1}{2} \sum_p \sum_k (t_k - f(\sum_j w_{jk} o_j))^2 \quad (10)$$

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. 시그모이드 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)} \quad (11)$$

이러한 관계와 학습오차의 진동을 줄이고, 수렴속도를 빠르게 하기 위해 모멘텀 항(momentum term)을 고려하면 연결강도의 변화량은 다음과 같고, 이 변화량만큼 연결강도를 변화시키면 에너지함수 J 는 감소하게 된다.

$$\Delta w_{ij}(t+1) = -\eta \frac{\partial J}{\partial w_{ij}} + \alpha \Delta w_{ij}(t) \quad (12)$$

$$\Delta w_{jk}(t+1) = -\eta \frac{\partial J}{\partial w_{jk}} + \alpha \Delta w_{jk}(t) \quad (13)$$

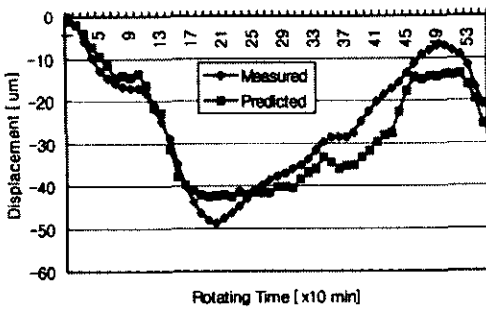


Fig. 8 Estimated results for thermal errors in Z axes by neural network model

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

오차예측 모델은 작업조건에 따른 온도변화 특성과 열변형 오차 특성을 이용하여 예측모델을 구축했고, 구축된 예측모델을 이용하여 임의의 실험에서 발생하는 열변형 오차를 예측했다. 예측실험결과는 Fig. 8과 같이 약 10 μm 이내까지 예측신뢰도를 보였다.

향후 열변형 오차 보정시스템을 제작하여 PC-NC를 채용하고 있지 않은 CNC공작기계에 적용할 계획이다. 본 시스템은 상용 공작기계로부터 스피нду일 유니트의 현재 위치좌표와 오차예측 모델을 이용하여 Offset을 보정할 수 있으며, 전용시스템으로 개발함으로써 향후 PC-NC 및 CNC공작기계에 적용할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 다양한 작업조건에 의해서 CNC공작기계에서 발생하는 열변형 오차를 신속하게 측정하여 실시간적으로 보정하기 위한 방법을 개발하기 위한 일환으로 접촉식 프로브와 갭 센서를 사용하여 작업조건에 따른 수직형, 수평형 머시닝센터의 온도변화 특성과 열변형 오차를 측정/해석했고, 신경회로망 모델을 이용하여 열변형 오차예측 모델을 구성하여 오차예측을 위한 기초실험을 수행했다. 이러한 실험결과로부터 본 논문에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 갭 센서와 접촉식프로브를 이용하여 신속하고, 고정

도로 열변형 오차를 측정했고, 오차예측 모델을 이용하여 오차보정 가능성을 검토했다.

- (2) 머시닝센터의 경우 구조특성에 의해서 X축에 비해서 Y, Z방향의 오차가 크게 나타났는데 이는 발생열원이 Y축에 직접적인 영향을 미치기 때문이다. 수직형 머시닝센터의 경우 외팔보 구조로 인해서 Y, Z축 방향의 열변형 오차는 발생온도에 의해서 직접적인 영향을 받는다. X축은 열적 대칭구조로 인해서 열변형 오차특성이 크게 나타나지 않았다.
- (3) C형 구조의 수직형 머시닝센터의 경우 수평형에 비해서 열적으로 불안정한 구조를 가지고 있으며, 발생열원에 의해서 수직형은 구조가 열리는 방향으로 열변형이 발생하고, 수평형의 경우는 닫히는 방향으로 열변형이 발생한다.

참 고 문 헌

- (1) J.S. Chen, et al, "Thermal Error Modeling for Volumetric Error Compensation", Sensors and Signal Processing for Manufacturing, PED-Vol.55, ASME, 1992.
- (2) S.Yang, et al, "Accuracy Enhancement of a Horizontal Machining Center by Real-Time Error Compensation", J. of Manufacturing Systems, Vol.15, No.2, 1996.
- (3) M.Yang, J. Lee, "Measurement and Prediction of thermal Error of a CNC Machining Center using Two Spherical Balls", J. of Materials Processing Technology, Vol.75, No.1-3, 1998.
- (4) Bryan, J.B., "International Status of Thermal Error Research (1990)", Annals of the CIRP, Vol.39, No.1, 1990.
- (5) JaeJong LEE, MinYang 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) 이재종 외4, "작업조건에 따른 공작기계의 열변형 특성 해석", 한국공작기계학회 추계학술대회논문집, 2000.