

수직형 밀링머신의 열변위보정에 관한 연구

박 윤 창

선문대학교 공과대학 기계 및 시스템공학부

Thermal Deformation Error Compensation for the vertical milling machine.

Yoon-Chang Park

Department of Mechanical Engineering, Sunmoon University

Abstract

A method for the evaluation and the compensation of the vertical milling machine is presented. The method used a mathematical model of thermal deformation based on temperatur variations of the machine and the environment. It follows an empirical approach and requires low cost equipment to be applied. According to this study, machine error caused by thermal deformation will be reduced to about 1/6.

1. 서 론

공작기계의 위치오차에는 여러 가지 요인이 작용한다. 그 중에서도 공작기계 내부 및 외부의 열적요인에 의한 공작물과 공구간의 상대위치변화, 즉 열변위는 위치오차에서 무시될 수 없는 비중을 차지하고 있다. 특히 장시간 무인자동으로 가동되는 생산시스템이나 광학부품류를 생산하는 초정밀공작기계등에서 시간경과에 관계없이 항상 일정한 치수의 제품을 생산하는데 있어서 매우 심각한 문제로 제기되고 있다.

이러한 공작기계의 열변위에 대한 대책으로 많은 연구가 진행되고 있는데, 일반적으로 가장 우선하여 열원을 제거 혹은 억제시키고, 발생된 열을 차단, 혹은 급속배출시키는 방식이 기본적인

로 적용되고 있다. 또한 현재 일반 공작기계에서 종종 적용되고 있는 열대칭구조설계(-공작기계의 구조를 내부열원에 대하여 열대칭으로 설계하는 방법-)는 열변위가 발생하더라도 공작물과 공구사이의 상대위치변화가 야기되지않기때문에 효과적인 열변형대책이지만 다양한 공작기계에서의 구조와 기능등에 따라서 이를 적용하기 어려운 경우도 많다. 좀더 적극적인 열변형대책으로는 일정한 온도의 기름이나 공기는 혹은 오일-미스트(oil-mist)를 이용하여 기계 내외부를 순환시키는 방법이 있고, 또는 초정밀공작기계에서 Super-Invar를 사용하거나 정밀연삭기에서 저열팽창 주물을 이용하는 등의 방법이 이용되고 있지만 이러한 장치를 구성하는 소요되는 비용이 곧 원가상승으로 이어지기 때문에 공작기계생산업체에서 주저하고 있는 실정이다.

반면에 비교적 저렴한 방법으로서 열변위 발생을 허용하면서 그 양만큼 서보를 제어하여 보정하는 여러가지 방법들 연구발표되고 있는데 그 중에서 열변위량을 직접 측정하여 보정하는 방법은 열변위 측정장치가 필요하게 되고, 측정에 필요한 기준점을 확보하는 것이 어려운 단점이 있다.

열변위를 예측하여 보정하는 방법에는 열발생량부터 온도분포 및 열변위를 유한요소법이나 유한차분법등을 이용하여 계산하는 경우가 있지만 표면도장상태나 연결부의 접촉상태등에 따른 경계조건에서의 미소오차에 민감하게 영향을 받기때

문에 정확성을 높이기 위하여 부분적으로 실험치를 이용하는 경우도 있다. 이러한 단점을 보완하고 정도와 신뢰성을 향상시키기 위해서 기계 중요부의 온도분포를 측정하고 온도분포로부터 열변위를 계산하여 보정하는 방법들이 시도되고 있다. 이 방법에서 온도분포로부터 열변위를 계산하는 과정에 유한요소법이 대표적으로 이용되고 있다. 이것은 방대한 계산량으로 인하여 컨트롤러(Controller)에 많은 부하를 가하게되기 때문에 동작기계의 전체가 아닌 부분적인 열변형대책으로 적용되어 효용가치가 있는 결과들이 발표되고 있다.

본 연구에서는 신뢰성을 확보하는 측면에서 기계의 중요부위 온도를 직접측정하고 그때의 열변형을 동시에 측정하여 온도분포와 열변형사이의 관계를 간단한 수식으로 모델링하여 실험적으로 수학적관계식을 유도하고, 이 관계식을 이용하여 측정된 온도로부터 열변위를 예측하여 보정하는 방법을 연구하였다. 이 방법은 간단한 수식으로 모델링하기 때문에 계산량이 많지않고 계산시간이 거의 무시될수 있기 때문에 CPU에 별도의 부하가 가해지지않으며 무엇보다도 신뢰성이 높다는 장점을 지니게 된다.

2. 본 론

2.1 실험

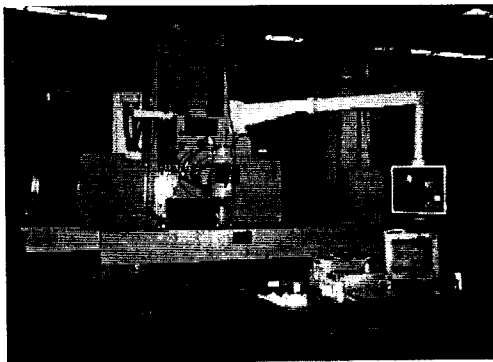


Fig. 1 Vertical milling machine(CNC Type)

본 연구에서 NC밀링머신을 실험대상기계로 사

용하여 온도와 열변위를 측정하고 양자간의 수학적 관계식을 실험적으로 구하기 위하여 그림 1과 같은 실험장치를 구성하였다. 이송축의 백래쉬(Back-lash)영향을 배제시키기 위해서 테이블을 원점 -> 10mm -> 100mm -> 190mm -> 200mm -> 원점으로 연속적으로 반복이송시키면서 온도와 열변위값을 아침 9시부터 오후 5시까지 8시간 동안 매 10분간격으로 수집하였다. 측정환경은 대기 온도의 영향이 포함되기 때문에 특별히 고려하지않았고, 기계내부에 7곳과 대기 온도를 포함하여 모두 8곳의 온도는 열전대로 측정하였다. 열전대에서의 아날로그신호는 A/D변환기에서 디지털로 변환되어 개인용컴퓨터(PC,386SX)에 입력된다. 그때 10mm, 190mm에서의 열변위는 Gap Sensor로 측정되어 PC로 입력된다. 이러한 실험을 다양한 조건(-절삭유 ON/OFF, Oil Con.ON/OFF, Spindle ON/OFF-) 하에서 총 12회 실시하였다. Fig. 2은 본 실험에서 측정된 온도상승이고, Fig. 3은 열변위의 측정 결과를 표시하고 있다.

표 1. Specification of Gap Sensor

Gap Snesor	Convertor AEC-5505 Probe PU-05 Probe Cable PC-03
Useable Range	0 to 2000um
Output	-5V - +5V (5mV/um)
Resolution	0.5 um
Frequency Range	DC to 20Khz -2dB
Operating Temperature Range	-30도 to 120도
Temperature Variation	Convertor : within 0.1%/도 Probe : within 0.02%/도
Linearity	within 0.5%
Power Supply	12VDC 40mA(DC stablizer)

2.2 온도와 열변위 사이의 관계식 유도

그림 1과같이 기계내부의 온도 7곳과 대기 온도를 합쳐서 총 8곳의 온도를 측정하면서 10mm와 190mm위치에서의 그때의 위치오차를 측정하였다. 측정된 온도분포와 가공에 영향을 미치는 열

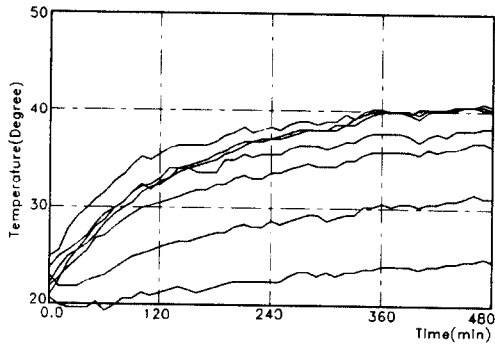


Fig. 2 Measured temperature elevations

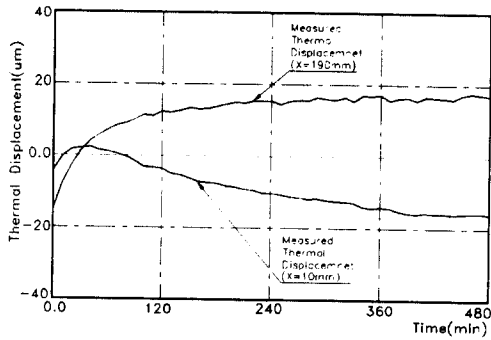


Fig. 3 Measured thermal displacements

변위 사이의 관계식을 구하는 방법으로는 유한요소법, 유한차분법, 경계요소법등이 주로 이용되고 있다. 이러한 접근에는, 서론에서 언급한 바와 같이, 경계조건에서의 미소오차가 매우 민감하게 작용하기 때문에 신뢰성 높은 결과를 얻기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 공작기계로서 갖추어야 할 신뢰성과 안정성을 고려하여 회귀분석법이 이용되었다.

회귀분석법(Regression Analysis)이란 변수들간의 관련성을 규명하기 위하여 어떤 수학적 모형을 가정하고, 이 모형을 측정된 변수들의 데이터로부터 추정하는 통계적 분석방법을 의미하며, 일반적으로 이 추정된 모형을 사용하여 필요한 예측을 하거나 관심있는 통계적 추론을 하게 된다.

본 실험에서는 8곳의 온도값(T_1, T_2, \dots, T_8)을 독립변수로, 10mm위치에서의 열변위로 인한 위치오차값(E_c)과 190mm위치에서의 열변위로

인한 위치오차값(E_d)을 종속변수로 하고, 온도와 열변위 사이에는 1차함수의 관계를 갖는다고 가정하여 다음과 같이 모델링하였다.

$$E_{ci} = \beta_{c0} + \beta_{c1}T_{1i} + \dots + \beta_{c8}T_{8i} + \epsilon_{ci} \quad (1)$$

$$E_{di} = \beta_{d0} + \beta_{d1}T_{1i} + \dots + \beta_{d8}T_{8i} + \epsilon_{di} \quad (2)$$

식(1)에서 미지의 계수값($\beta_{c0}, \beta_{c1}, \beta_{c2}, \dots, \beta_{c8}$)의 추정은 최소제곱법(Least Square Method)에 의해 구해진다. 이 방법은 식(1)의 추정오차 ϵ_{ci} 의 제곱의 합

$$S_c = \sum_{i=1}^n \epsilon_{ci}^2 \quad (3)$$

$$= \sum_{i=1}^n (E_{ci} - \beta_{c0} - \beta_{c1}T_{1i} - \dots - \beta_{c8}T_{8i})^2$$

을 최소화하는 $\beta_{c0}, \beta_{c1}, \beta_{c2}, \dots, \beta_{c8}$ 을 구하는 방법이다. 이를 위해서 S_c 를 $\beta_{c0}, \beta_{c1}, \beta_{c2}, \dots, \beta_{c8}$ 에 대하여 각각 편미분하여 다음 관계식을 얻는다.

$$\frac{\partial S_c}{\partial \beta_{c0}} = 0, \frac{\partial S_c}{\partial \beta_{c1}} = 0, \dots, \frac{\partial S_c}{\partial \beta_{c8}} = 0. \quad (4)$$

식(4)에서 얻어진 9개의 연립방정식으로부터 $\beta_{c0}, \beta_{c1}, \beta_{c2}, \dots, \beta_{c8}$ 의 값을 구하게 된다. 이 식을 행렬(Matrix)형태로 표시하면,

$$[T]^T [T] \{ \beta_c \} = [T]^T \{ E_c \} \quad (5)$$

여기서, $[T]$ 는 온도-매트릭스, $[T]^T$ 는 $[T]$ 의 전치매트릭스, $\{ E_c \}$ 는 열변위-매트릭스이다. 여기서 $\{ \beta_c \}$ 를 계산하는 방법에는 SVD, Givens, Given2, Householder, LU decomposition과 Choleski's Method등이 있는데 본 연구에서는 Iteration Method(반복계산법)이 이용되었고,

190mm위치에서의 열변위 $\{E_d\}$ 와 이에 대한 추정계수값 $\{\beta_d\}$ 도 동일한 과정을 거쳐 계산될 수 있다. 추정계수값에 대한 계산결과는 다음과 같이 얻어졌다.

$$\{\beta_c\} = \begin{bmatrix} -32.183 \\ 0.999 \\ -0.80 \\ 1.596 \\ \vdots \\ -0.712 \end{bmatrix}$$

$$\{\beta_d\} = \begin{bmatrix} -58.962 \\ 0.451 \\ -1.377 \\ 0.600 \\ \vdots \\ -0.176 \end{bmatrix} \quad (7)$$

이 값들을 식(1)과 (2)에 대입하면 기계각부위의 온도와 열변위 사이의 관계식이 다음과 같이 구해진다.

$$E_c = -32.2 + 1.0T_1 + \dots - 0.712T_8 \quad (8a)$$

$$E_d = -59.0 + 0.45T_1 + \dots - 0.18T_8 \quad (8b)$$

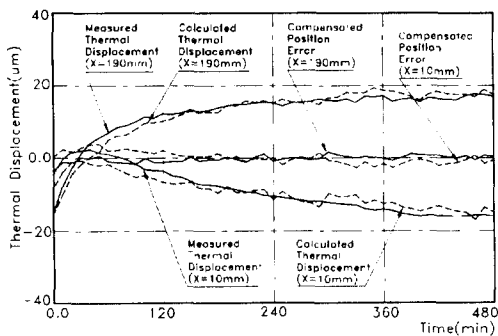


Fig. 4 Comparison between thermal error with compensation and without compensation (I)

2.3 모델링에 대한 정확성 검토

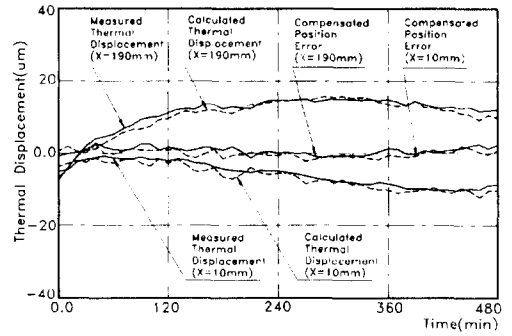


Fig. 5 Comparison between thermal error with compensation and without compensation (II)

회귀분석법에 의해 구해진 온도와 열변위 사이의 수학적모델의 정확성을 검증해보기 위해서 측정데이터중에서 10mm위치에서의 열변위와 그때 측정된 온도값을 식(8a)에 대입하여 구해진 열변위의 관계를 Fig. 4에 표시하였다. 이 때의 열변위는 $2\mu\text{m}$ 에서 $-16\mu\text{m}$ 까지 전체 $18\mu\text{m}$ 의 변화를 보이고 있으며, 온도로부터 구해진 열변위값이 약 $5\mu\text{m}$ 범위에서 일치하고 있음을 볼 수 있다. 따라서 식(8a)의 모델을 이용하여 열변위를 보정할 경우에 종전의 열변위오차를 약 1/6로 줄일 수 있음을 알 수 있다.

Fig.5는 190mm에서의 측정데이터중에서 열변형오차를 식(8b)의 모델을 이용하여 보정한 결과를 보여주고 있다. 이 결과에서는 종전에 $-13\mu\text{m}$ 에서 $17\mu\text{m}$ 까지 약 $30\mu\text{m}$ 의 변화폭을 $4\mu\text{m}$ 로 보정할 수 있기 때문에 종전 오차의 약 1/7로 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

3. 결론

본 연구에서는 여러가지 조건하에서 기계 중요부위의 온도분포와 그때의 열변형을 측정하였고, 이 온도들과 열변형의 관계를 1차함수로 모델링하고, 회귀분석법으로 관계식을 구하였다. 이 관계식에 측정된 온도값을 대입하여 구해진 열변형량과 측정된 열변형량사이에 대략 $5\mu\text{m}$ 정도로 일치되고 있어서, 온도분포로부터 예측된 열변형량을 보정할 경우에 발생된 열변형량을 1/6이하로 줄일 수 있는 가능성을 확인하였다.

또한 이러한 방법이 적용될 경우에는 시간경과에 따른 기계정도 변화(열변위)가 보정되기 때문에 장시간 무인자동 가공에서도 일정한 칫수의 제품 생산이 가능하게 되고, 열변위 보정장치가 정상적으로 작동한다면, 열변위 억제를 위한 절삭유와 윤활유의 온도 제어기 및 오일샤워장치등의 열변형 억제장치류들을 줄일 수 있을 것으로 기대된다. 뿐만아니라 앞의 보정결과를 살펴보면 기계작동 초기 시간에서도 양호하게 보정되기 때문에, 기계가 열적 안정상태에 도달할 때까지 공전시킬 필요가 없게 된다. 하지만 높은 신뢰성이 요구되는 공작기계에 이 방법이 적용되기까지는 충분한 신뢰성 시험이 필요하고, 온도측정센서의 노이즈 방지대책과 비정상작동에 대비한 안전장치등이 강구되어야 할것이고, 주변온도여건(일교차, 여름과 겨울, 흐린 날과 맑은 날)에 따라 민감하게 변하기 때문에 좀더 다양한 조건에서의 실험 데이터로부터 온도와 열변위의 관계식이 도출되어야 하며, 온도센서설치장소에 대한 최적화와 실험횟수를 줄일 수 있는 실험기법에 대한 연구가 좀더 진행되어야 할 것이다.

4. 참고문헌

- [1] J. Bryan, "International Status of Thermal Error Research(1990)", Annals of the CIRP, Vol. 39/2/1990.
- [2] (사) 기계기술협회, "생산가공기술에 따른 열의 문제", 88.12.13 (일본).
- [3] G. Spur, E. Hoffman, "Thermal Behaviour Optimization of Machine Tools", Annals of the CIRP Vol. 37/1/1988. pp401-405.
- [4] Toshimichi Moriwaki, "Thermal Deformation and Its On-Line Compensation of Hydrostatically Supported Precision Spindle", Annals of the CIRP Vol. 37/1/1988. pp393-396.
- [5] Mitsuyasu Matsuo, "A Method of Thermal Displacement Compensation For Machining Center by Temperatures Measured on the Machine(1st Report)", JSPE, 57-03, pp153-157, 1991.