

## 고속이송계의 열변형오차 자동보정에 관한 연구

조성복\*(창원대 기계공학과), 박성호(창원대 대학원 기계공학과), 고해주(위아(주)), 정윤교(창원대 기계공학과)

### The Study on Automated Compensation of Thermal Deformation for High Speed Feed Drive System

S. B. Cho\*, S. H. Bark(Mech. Eng. Dept., CWU), H. J. Ko(WIA Co.), Y. K. Jung(Mech. Eng. Dept., CWU)

#### ABSTRACT

It can be acquired the high effective productivity through of high speed, precision of machine tools, and then, machine tools will be got a competitive power. Industrially advanced countries already developed that the high speed feed is 60m/min using the high speed ball screw. Also, a lot of problems have happened the feed drive system. It is necessary to study about the characteristics of thermal deformation played a more critical role than static stiffness and dynamic rigidity in controlling the level of machining accuracy. In spite of the improving the thermal deformation characteristics of machine tools at the design stage, there are always some residual errors that have to be compensated for during machining.

In this study, thermal deformation error automated compensation device with multiple linear regression is proposed that thermal deformation error can be eliminated at the machining stage. The developed device has been practically applied to the feed drive unit.

**Key Words** : Machine tool (공작기계), High speed feed drive system (고속이송계), Thermal deformation (열팽창), Automated Compensation (자동보정)

#### 1. 서론

공작기계의 가공정밀도는 운동기구가 가지고 있는 기하오차와 절삭작업 중에 발생하는 진동, 열, 절삭력에 의해서 공작기계의 구조계, 주축계, 이송계의 변형에 의해서 직접적인 영향을 받는다.

이러한 가공정밀도는 기하오차 보다 열변형 오차에 의해서 큰 영향을 받고, 공작기계에서 발생하는 오차의 40~70%는 열변형 오차에 의해서 영향을 받으며 이는 제품의 정밀도 및 품질에 직접적인 영향을 미친다.

이송계는 기계의 운전 중 모터의 구동과 베어링, 너트의 마찰 등 여러 가지 요인에 의해 필연적으로 열이 발생하게 된다. 기계 각 부분의 발열로 인한 열변형은 가공물의 정밀도 저하와 직결되며, 특히 생

산자동화 시스템에서 공작기계의 무인-장시간 운전에 대해 가공물이 일정한 정밀도를 유지하기 위해서는 열변형에 대한 대책이 필수적이라 하겠다. 열변형 대책에 대한 연구는 열변형량의 수치해석적인 접근 방법, 발열을 억제하여 변형 자체를 없애기 위한 냉각 시스템을 사용하는 방법, 설계수준에서 열변형을 고려한 설계 등이 있으나, 좋은 결과를 얻지 못하고 최근에는 설계단계의 불완전한 대책을 보완하기 위하여 허용된 오차량을 서보 조정을 통하여 해결하는 방법이 주로 연구되고 있다. 이에 관련해 열변형량을 추정하는 모델이 보정결과에 많은 영향을 미치는 것으로 나타나고 있다. 열변형 오차 모델링 기법으로 가장 많이 사용되는 방법은 다중회기법과 신경회로망을 이용하는 방법 등이 있으며, 이러한 연구는 공작기계에 부분적으로 적용되고 있으나 아직까지 상품화한 경우는 더물며, 일본 오쿠마기공에서

개발한 Neuro-Fuzzy 시스템을 적용하여 상품화한 사례가 있다. 현재 우리 나라에서도 이에 관해 적극적인 연구들을 행하고 있으나 열변형 오차의 특성이 시간에 따른 급격하게 변하는 특성을 가지고 있기 때문에 공작기계와 연계한 신속한 실시간 오차보정 방법을 필요로 하고있다. [1-5]

본 연구에서는 온도센서와 온도수집보드 및 레이저 측정기를 사용하여 60 m/min의 고속이송계를 8시간 연속가동을 통한 축의 변형량과 온도 관계를 다중 회기분석법을 통하여 예측식을 수립하고, 이 모델을 이용하여 고속이송계의 실시간 열변형 오차 보정 시스템을 구성하는 것을 연구의 목표로 한다.

## 2. 열변형 해석

### 2.1 고속이송계 열변형 오차측정 시스템

열변형 보정을 통한 고속 이송계의 열변형 제어는 수집된 데이터를 해석하여 온도와 변형량 관계식을 구한 후, 기준 좌표계에 대해 합성하여 열변형 보정식을 유도한다. 이 보정식을 고속이송계에 적용하여 실시간으로 보정이 이루어지며 검증된다. Fig. 1은 열변형 제어 해석과정의 순서도를 나타낸 것이다.

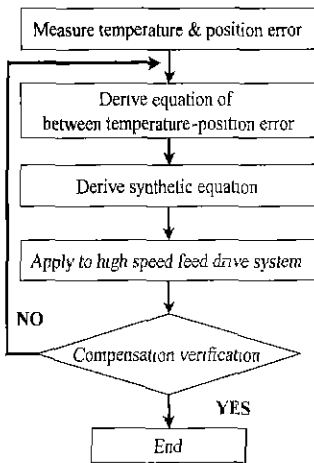


Fig. 1 Flow chart of the heat deformation control

테이블은 볼스크류 이송계에 의해 원하는 위치로 이동한다. 이 경우에 서보모터의 구동에 의한 발열, 볼스크류를 지지하는 양단의 베어링과 이송계에 연결된 볼너트에서 발생하는 마찰에 의한 발열에 의해 볼스크류 이송계 전체가 열변형을 하게된다. Fig. 2는 이송계 각 부위에서 발생한 온도를 나타내고 있으며, Fig. 3은 이송계에 발생한 온도에 따른 각 부위

의 위치오차 변화를 나타내었다. Fig. 2, 3을 통하여 온도와 열변형 사이에 밀접한 관계가 있음을 확인할 수 있다.

열변형에 의한 이송계의 위치오차는 기계의 발열 상태를 나타내는 온도 T와 이송위치 Z의 관계로 나타낼 수 있다. 열변형 위치오차가 위치 Z에서 이송계의 위치 오차( $E_{BS}$ )는 볼스크류 열변형에 의한 어떤 기준 위치의 변화와 볼스크류의 열팽창에 의해 나타나게 되는 오차로 구분할 수 있다. 볼스크류의 전체 구간의 열팽창량을  $E_{Exp}$ 라 하면, 위치 Z에서 볼스크류의 열팽창량 때문에 발생하는 오차는 비례관계에 의해  $Z/400 * E_{Exp}$ 이다. 기준위치를 측정원점 0 mm로 하여, 0 mm지점의 열변형에 의한 위치의 변화를  $E_0$ 라 하면, 위의 볼스크류 열팽창량  $E_{Exp}$ 와 합성하여 위치 Z에서의 볼스크류 위치오차는 다음과 같다.

$$E_{BS} = E_0 + Z/400 * E_{Exp} \dots \dots \dots (1)$$

식 (1)과 같은 관계식은 기계의 운전에 따라 Z축 원점 0 mm의 위치는 +Z 방향으로 이동한다 이것은 Fig. 4에서처럼 Z축 볼스크류가 기계원점 쪽의 베어링이 고정되어 있기 때문에 발열에 의한 볼스크류의 팽창에 따라 +Z 방향으로 이동하게 된다. Fig. 4는 발열에 의한 열팽창 전후의 볼스크류의 관계를 간략하게 나타낸 것이다.

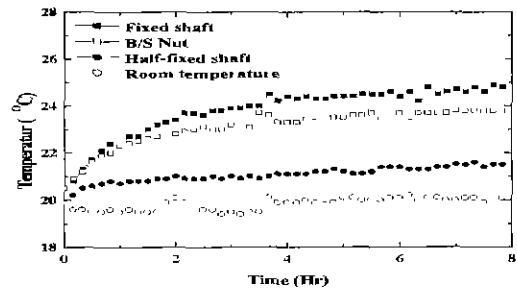


Fig. 2 Temperature variation

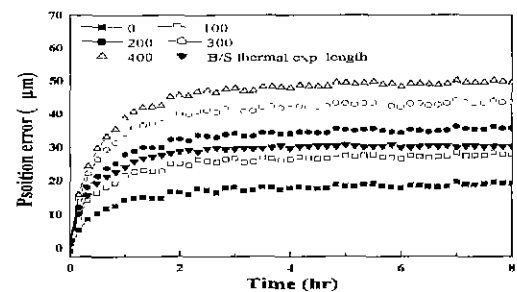


Fig. 3 Positioning error variation

볼스크류 열팽창량  $E_{Exp}$ 를 모델링하는 데에는 여러 가지 방법이 있으나, 본 연구에서는 다중 선형 회

기 모델링(Multiple linear regression model)을 이용하였다. 고속이송계 각 발열원의 온도와 측정된 위치 오차간의 관계는 다중 선형 회귀모델로 모델링(식 2) 될 수 있다.

$$\Delta E_{EXP} = \beta_1 \Delta T_1 + \beta_2 \Delta T_2 + \beta_3 \Delta T_3 + \dots + \beta_n \Delta T_n + \varepsilon \dots \dots \dots (2)$$

여기서  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_n$ 은 온도에 대한 계수,  $\varepsilon$ 은 열변형 오차에 있어서의 상수이다. 각 온도들과 열팽창량 사이에 선형적 관계를 가정할 수 있고, 기본적으로 중회귀 분석법을 이용하여 볼스크류 열팽창량에 대한 해석을 수행하였다.

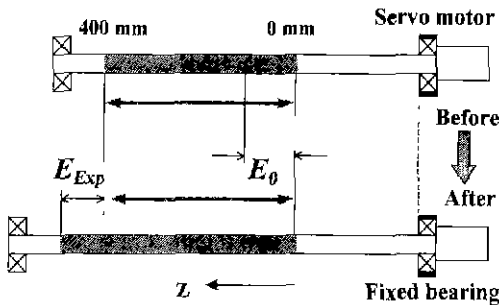


Fig. 4 Fixed bearing and heat deformation

### 3. 실험장치 및 실험방법

전 행정 400 mm의 이송계를 100 mm씩 8시간 연속으로 이송속도 60 m/min으로 구동하면서, 고속이송에 따른 발열량을 측정하기 위해 온도 검출 센서를 볼스크류 너트부, 고정축, 반고정축에 설치하여 온도 변화를 측정하였으며, 이때 사용되어진 온도 검출센서는 주위환경에 강하고, 온도검출 오차가  $\pm 1^\circ\text{C}$ 이하인 백금축은 저항체를 이용하였다. 온도센서를 설치한 각 부위의 온도는 8시간 연속으로 자동 측정하여 자체 제작한 온도수집 보드를 통하여 데이터를 수집하고, RS232C를 사용하여 PC로 데이터를 전송하며, 수집된 데이터는 실시간으로 그래픽처리가 가능하도록 하였다. 위치 검출은 레이저 간섭계를 이용하였으며, 각 부위의 발열량과 위치오차를 이용하여 보정식을 도출하는데 이용하였다. Fig. 5, 6은 본 실험에서 구축한 실험장치 간략도와 사진을 나타내었다.

실시간 열변형 보정장치를 구성하기 위해서는 CNC내 연산 처리가 가능한 MACRO 기능이 있어야 하고, 또한 MACRO 프로그램을 이용하여 보정제어 기술에 사용하였다. 실험에 사용한 FANUC의 경우는 대화형 MACRO를 사용하고 있으며 구성은 온도 센서에서 누적 평균한 온도 데이터를 데이터 수집

보드에서 가지고 있을 때, CNC에서 온도 데이터를 요구하게되면 RS232C 통신규정에 따라 온도 데이터를 수집보드에서 CNC로 전송하게 된다. MACRO에서 온도와 이송오차 사이의 보정관계식을 이용하여 열변형량을 예측하고 그에 따라 기계보정 파라미터로 공작물 좌표계를 Shift하는 것으로 구성하였다.

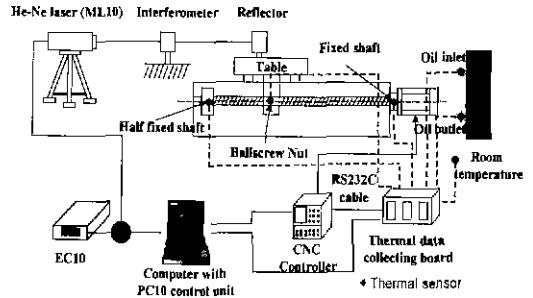


Fig. 5 Experimental setup



Fig. 6 Photo of high speed feed drive system

### 4. 열변형 해석결과 및 검증

고속이송계의 열변형 오차 자동보정을 실현하기 위하여 측정된 온도와 열변형 오차를 이용하여 다중 선형회귀분석법 모델을 이용하였고, 이를 위한 기초 실험으로 Fig. 2에서 열발생량은 고정축, 볼스크류 너트부, 반고정축, 실온의 순서로 온도변화가 나타나고 있으며, 고정축 최대  $5^\circ\text{C}$ 의 온도상승이 나타난다. Fig. 3은 이때 나타난 고속 이송계의 위치별 오차로 열팽창량이 최대  $30 \mu\text{m}$ 로 나타나고 있다.

Fig. 7에서는 볼스크류의 팽창량을 기초 실험과 해석식을 통한 차이를 나타내고 있으며, 두 위치오차의 차이는 최대  $6.4 \mu\text{m}$ 로 해석에 사용한 모델링이 유효함을 확인 할 수 있다. Fig. 8은 실험과 해석식을 통한 각각의 위치별 오차를 나타낸 것으로, 경향이 비슷하게 나타내며, 시간의 경과에 따라 점차 이송오차가 적어져 이송시스템이 안정되어짐을

알 수가 있다. 이송계를 8시간 연속으로 가동하면서 열팽창량 자동보정을 검증하기 위하여, 합성한 보정식과 MACRO 프로그램을 이용하여 Z=400 mm 위치에 대하여 자동보정을 결과물 Fig. 9에 나타내었다. 시간의 경과에 따라 발생한 위치오차가 전체 시간에 걸쳐 15  $\mu\text{m}$  이내로 안정적인 자동보정이 이루어짐을 알 수가 있다. 가동 초기 급격한 위치오차 감소를 위하여 적당한 워밍업과정을 거쳐 더 나은 정밀도를 기대할 수도 있다.

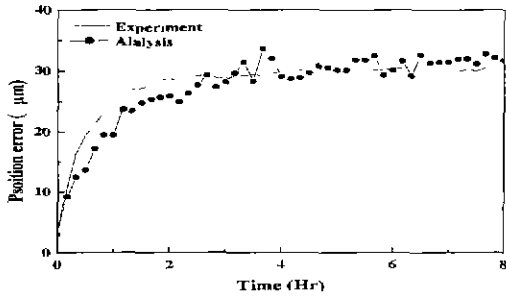


Fig. 7 Ball screw heat deformation of experiment and analysis

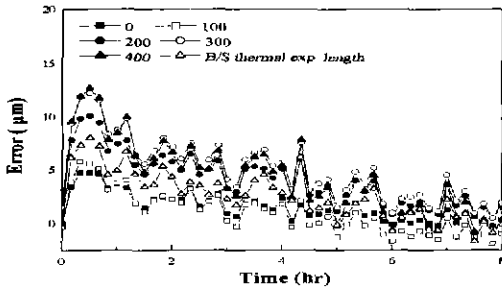


Fig. 8 Error between experiment and analysis

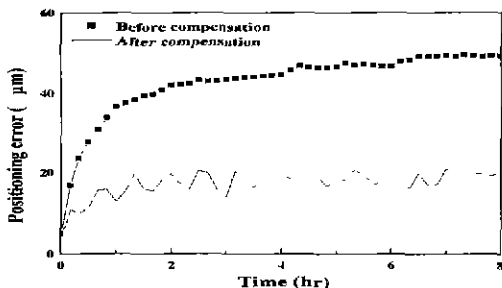


Fig. 9 Verification of heat deformation error compensation ( Z = 400 mm )

#### 4. 결론

본 연구에서는 60 m/min 고속이송계의 구동에 있어서 발열에 따른 온도와 변형량의 상관관계식으로부터 이송계 전체에 대한 보정식을 적용하여 열팽창 오차의 자동보정에 관한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 60 m/min의 고속이송계를 연속으로 자동보정을 실시하기 위해 온도센서, 온도수집보드 및 보정용 MACRO를 활용하여 자동보정 시스템을 구성하였다.
2. 고속이송계에서 실험을 통해 측정된 온도와 열변형과의 관계를 규명하기 위해 다중회귀분석법을 사용하여 열변형 해석식을 제시하였다.
3. 열변형 오차 모델링을 이송계에 적용한 결과 열변형량이 실험치와 모델링에 의한 해석식의 열팽창량이 근접함을 알 수 있었다.
4. 구성된 열변형 자동보정장치를 고속이송계에 적용하여 8시간 동안 실시간 자동보정을 실행한 결과 열변형 오차를 15  $\mu\text{m}$  이내로 줄일 수 있었다.

#### 후기

본 연구는 한국과학기술원 지정 창원대학교 공작기계기 술연구센터 지원에 의한 것입니다. 관계자에게 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Bryan, J. B., "International status of Thermal error Research(1990)", Annals of the CIRP, Vol.39, No.1, pp.645-656, 1990
2. 이재중, 최대봉 "머시닝센터의 열변형 오차 자동보정 알고리즘", 한국정밀공학회 '99년도 추계학술대회논문집, pp.235-238, 1999
3. 이강인, 조동우, "수정된 신경망을 이용한 공작기계의 열변형 오차 예측모델 개발", 한국정밀공학회 '99년도 추계학술대회논문집, pp 231-234, 1999
4. Nayaran Srinvasa, John C Ziegert, "Automated measurement and compensation of thermally induced machine tool error in real machining", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol.37, pp.159-16, 1996
5. S. Fraser, M. H. Attia, M. O. M. Osman, "Modelling, identification and control for thermal deformation of machine tool structure, Part 5 : Experimental verification", ASME, Vol. 121, pp.517-523. 1999