

## 볼나사 열변형에 따른 반복정밀도 개선에 관한 연구 A Study on Improvement of Repeatability induced Thermal deformation of the ball screw

조 규재(조선대), 홍 성오 (조선대 대학원).

### ABSTRACT

Thermal expansion of the ball screw in semi-closed loop type CNC Lathe directly affects the position precision along the travel axis. In this paper, the thermal displacement of the ball screw is estimated by using macro variables. The estimated displacements of the ball screw are managed by calculating the interval of pitch error rate in the NC. The thermal behaviour of the ball screw of the CNC Lathe, under the constant operating conditions, was measured to examine the effectiveness of this compensation method. The results showed that thermal displacement of the ball screw could be maintained its accuracy better than  $6\mu\text{m}$  while applying this method.

Key words : CNC Lathe(CNC 선반), Ball Screw(볼 나사), Thermal expansion(열팽창), compensation (보정), positioning accuracy(위치정도), macro variable(매크로 변수).

### 1. 서 론

생산 가공기술의 향상과 더불어 정밀 공작기계의 수요가 확대되고 있으며, 정밀 공작기계의 고급화와 자동화에 따라 점점 고정밀도가 요구되고 있는 실정이다. 특히 공작기계는 기존의 방법에 의해 공장 자동화 및 무인화는 가능하지만, 작업 중에 발생하는 열변위와 공구마모 등에 의한 오차량을 제어할 수 없기 때문에 보상 과정이 없이는 가공 정밀도를 기대할 수 없다. 공작기계의 고강성화, 고정도화, 고속화를 추구하고 있어 정밀도가 높고 강성이 큰 볼나사가 제작 사용되고 있다. 볼나사는 미끄럼 마찰을 구름마찰로 변환시켜 이송마찰과 마모량을 줄여 정밀도와 수명을 향상시킨 동력전달용 나사로써, 넓은 대응성 및 제어성이 용이하다는 장점이 있어 공작기계의 이송 및 위치결정 요소로 널리 사용되고 있다. 하지만 공작기계의 이송계에서 볼나사 열변위를 제거할 수 있는 폐쇄 회로 방식은 설치 및 가격 상승 등의 단점이 있으므로 일반적으로 반 폐쇄 회로 방식을 적용하고

있으나, 최종 제어대상인 테이블에서 위치를 검출하기 때문에 볼나사의 열변형이 그대로 남아 있어 위치결정 정도에 영향을 끼칠 수 있다. 이 때문에 열팽창에 의한 열변위량을 줄이기 위하여 강성을 높이고, Backlash를 제거하며, 고정밀도를 유지할 수 있도록 볼 나사에 예압을 가하는 방법이 사용되고 있다. 그러나 이 방법은 나사축과 너트사이의 마찰저항이 증가되어 볼나사의 자체 온도상승의 문제를 피할 수 없다.

따라서 공작기계에서 볼나사 발열량을 제어하는 방법으로 볼나사의 1회전당 이동량을 크게 하거나, 볼나사와 지지 베어링 예압의 적정화 등이 주로 사용되고 있는데, 한편으로 소프트웨어를 이용한 보상 방법 등이 활발히 연구되고 있다.<sup>[1-4]</sup>

공작기계 볼나사의 열변형과 보상법에 대하여 Yoshiaki<sup>[5]</sup> 등은 운전 중에 이송(Feed), 서보 모터의 전류값을 이용한 볼나사 열변위 보정에 대하여, Mitsuyasu<sup>[6]</sup> 등은 기계의 온도상승 예측량으로

보정기능을 이용한 열변위 기능을 연구하였으며, Yamaguchi<sup>(7)</sup>는 볼나사의 열팽창과 위치결정 정도의 영향에 대하여 연구하였다. 그외에도 볼나사의 열팽창에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으나 아직 미흡한 상태이다. 따라서 본 논문에서는 CNC 선반의 볼나사를 사용하여 볼나사 열변위가 안정화되는 시간을 측정후 측정된 시간을 여러 구간으로 나누어 각 구간별로 볼나사 변위량을 측정한다. 또한 이들 변위량을 보정하기 위해, MACRO를 이용한 보정프로그램을 적용하여 보정한 후 위치결정 정밀도를 보정전과 비교 분석함으로써 볼나사를 이송 기구로 사용하는 공작기계에서 볼나사의 열변위가 안정화 되기 전에 열팽창으로 발생하는 반복 정밀도 저하를 개선하기 위한 조건을 실험을 통해 찾고자 한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 볼나사 온도 상승

볼나사는 서보 모터로 나사축을 회전시켜 Nut를 왕복운동을 시킴으로써, 나사홈과 강구와의 사이에 접선방향의 마찰저항에 의하여 나사축을 온도가 상승된다. 볼나사의 온도상승은 마찰에 의한 발열과 외부로의 방열이 일치 될 때 결정된다. 따라서 위치결정 정도가 중요한 공작기계에서는 이송기구에 사용되는 볼나사의 열변위는 직접 정도저하에 영향을 미치므로 볼나사 온도상승이 중요한 문제가 된다. 볼나사 온도 상승의 식은 식(1)과 같다.

$$\theta = \frac{Q}{\beta} \left( 1 - \exp\left(-\frac{\beta}{CM} t\right) \right) \quad (1)$$

여기서  $\theta$  : 볼나사 온도 상승치. (°C)

$Q$  : 단위시간의 발열량 (kcal/hr)

$\beta$  : 단위시간, 단위온도차의 방열량(kcal/hr·°C)

CM : 열용량 (kcal/°C)

t : 운전 시간 (hr)

### 2.2 열변위량

축 이송계에 적용되는 볼나사는 축 방향의 위치결정 정도가 공작기계의 이송에 따른 정도를 좌우하기 때문에 반경 방향의 열팽창은 무시되고 축 방향의 열팽창량만 고려된다. 볼나사 열변위  $\Delta L$ 은 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned} \Delta L &= \beta L \int_0^L \theta(x) dx \\ &= \beta L \Delta\theta \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $\beta$  : 나사축 재료의 선 팽창계수

$\Delta\theta$  : 나사 축의 온도 상승치

L : 나사 축 길이

여기서 볼나사의 열변위량을 줄이기 위해서는 식(2)로부터 볼나사 온도 상승값을 감소시켜야 하며 이를 위해서는 식(1)으로 부터 방열량을 증가시키면 된다. 발열량  $Q$ 은 식(3)으로부터 구할 수 있다.

$$Q = \frac{1.2N \cdot T}{J} \quad (3)$$

여기서 N : 볼나사의 회전속도(rpm)

T : 마찰 토오크 (kgf cm)

J : 열의일당량(427 kg.m/kcal)

따라서 발열량은 회전속도와 마찰토오크에 비례하고 볼나사에 의한 이송속도는 리이드와 회전속도에 비례하므로 볼나사의 리이드를 크게 하여 회전속도를 감소시키거나 적절한 예압으로 마찰토오크를 감소시켜야한다.

## 3. 실험 장치 및 방법

### 3.1 실험 장치

본 실험장치는 Fig.1과 같이 TAC, ball bearing 2열 정면조합(DF)형을 사용하여, 볼나사 너트와 조립오차에 의한 영향을 흡수하기 쉬운 양단지지로 구성하고 볼나사 축과 Servo Motor는 키플링으로 연결하였으며 정지와 구동은 프로그램을 작성하여 활용하였다. 열변위 실

험은 최대 이송 거리(400 mm)로 하였고 이송 범위를 초과할 경우에는 알람신호를 발생하도록 하기 위하여 양끝단에 DOG를 부착하였으며 테이블에는 리미트 스위치를 설치하였다. 구동중 양끝단의 정지 시간을 2 sec로 설정하였는데 이는 테이블이 양끝단으로 이송중 과부하가 발생하는 것을 방지하기 위함이다. 주위의 온도 영향을 고려해 항온실( $20^{\circ}\text{C} \pm 1$ )에 실험장치를 설치했다.

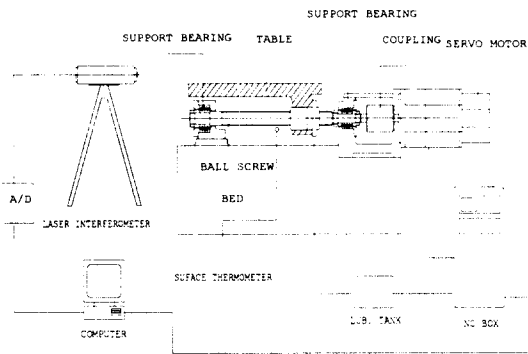


Fig.1 Experimental set-up for the measurement

본 실험장치에 사용한 볼나사는 누적 대표 리드 오차 E가  $13\mu\text{m}$ 이고 변동 오차가  $2\pi$  당  $6\mu\text{m}$ 인 C3 등급이며 사양은 Table 1과 같다.

TYPE	SPECIFICATION
MARKER	NSK
MAX. RPM	2000 rpm
LEAD	10 mm
ACCURACY GRADE	C 3
LUBRICATION	OIL
PRELOAD	150 kgf

Table 1. Specification of the Ball screw

## 2.2 실험방법

### 2.2.1 NC 제어 장치의 보정

다양한 보정 기능중 Custom Macro라고 불리는 기능이 있는데 이는 사용자가 자동 Cycle, Patten 기능등 독자적인 프로그램을 작성하여

Memory에 등록하여 두고 Sub Program과 같이 필요할 때에 프로그램으로 호출할 수 있으며, 특히 변수, 연산지령, 제어지령을 응용해 사용자가 필요로 하는 기능 등을 나타낼 수 있다.<sup>[8]</sup>

본 실험에서는 30분간 테이블의 왕복 운동 중에 2.5분 간격으로 12등분하여 각각의 구간을 MACRO 변수 #500부터 #511까지 설정하고 12구간을 기준으로 운동이 끝난 후 운동을 정지하고 4군데 위치에서 테이블 위치정도를 실측한 변위량을 MACRO 변수 #500부터 #511까지에 각각 입력하였다. 또한 각각의 시간에 대한 MACRO 변수는 5분 간격으로 설정하여 #100부터 #106까지 6등분하였다.

### 2.2.2 열변위량 측정

본 실험 장치는 레이저 간섭계의 설치가 용이하게 하기 위하여 고정 JIG를 사용하여 테이블과 볼 나사를 수평으로 설치하였다. 작성된 프로그램에 따라 실험 장치를 운전하였으며 온도와 열변위량 측정을 위하여 지정 시간과 위치에서 잠시 운전을 중지 시켰다.

볼 나사를 사용하는 정밀 공작기계등은 가공 작업을 실행할 때 볼 나사의 동작이 일정하게 유지되지 않고 간헐적으로 불규칙하게 동작을 하지만, 본 실험에서는 일정한 구간 범위 안에서 20m/min의 동일한 이송속도로 왕복운전을 반복 실행하였다.

먼저 NC 장치에서 원점 복귀를 실시하고, 자동 실행 프로그램을 적용하여 테이블을 5분 간격으로 왕복 이송운전을 시킨 후 측정을 위하여 일시 운전을 정지하고 이송구간(400mm)을 100mm 간격으로 등분한 각 지점의 변위량을 레이저 간섭계(Laser Interferometer)를 이용하여 측정하였으며 레이저 간섭계의 측정은 Software (HP, 5528A)를 사용하였고 측정값의 오차는  $\pm 0.1\mu\text{m}$ 정도이다.<sup>[9-10]</sup> 볼 나사의 표면의 온도는 온도가 가장 높게 상승하는 볼 나사의 중앙에 접촉식 표면 온도계를 사용하여 온도를 측정하였다. 이로부터 볼 나사의 온도 변화에 따른 열변위량을 결정할 수 있었다. 이를 기초로 온도 상

승에 따른 열변위량의 데이터를 MACRO를 사용하여 시간에 따른 열변위량의 데이터로 입력시켜 보정프로그램을 작성하였다. 이 보정프로그램을 적용하고 동일한 방법으로 테이블을 5분 간격으로 공회전 시킨 후 이송 구간을 4등분한 각 지점의 열변위량을 측정하였다.

#### 4. 실험 결과 및 고찰

Fig.1과 같은 실험 장치를 사용하여 20℃의 항온 조건에서 CNC 선반에서 사용하는 불 나사를 20m/min의 이송속도로 직선 왕복운동을 시켜 열변위량을 측정한 결과는 다음과 같다.

테이블 이송작업 시간에 따른 불 나사의 온도 변화는 Fig.4와 같은 결과를 얻었으며 그 결과를 기준으로 불 나사의 열변형이 안정화된 시간을 5분 간격으로 등분한 시간과 100mm 간격으로 등분한 이동 구간에서의 측정한 열변형은 Fig.2.3와 같은 결과를 얻게 되었다. 또한 동일한 조건에서 시간과 구간에 따라 보정량을 다르게 실행하도록 한 보정프로그램을 적용한 후 측정 한 실험 결과를 Fig.5.6에 나타내었다.

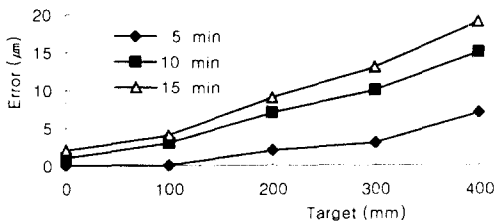


Fig. 2 The measured thermal displacement relative to the time after 5, 10, 15 min

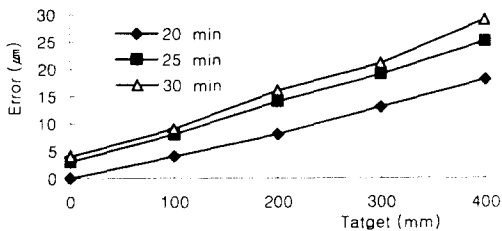


Fig. 3 The measured thermal displacement relative to the time after 20, 25, 30 min

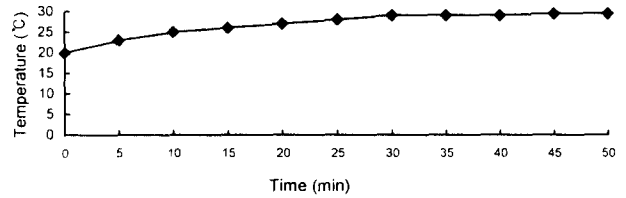


Fig. 4 The measured temperature relative to the time

Fig.4는 이때 시간의 변화에 따른 불나사의 표면 온도 변화를 나타내고 있는데 시간이 진행됨에 따라 일정한 분포로 상승(9℃)되고, 30분 이후 안정화됨을 알 수 있었다.

여기에서 위치결정 정도 오차가 발생하는 원인은 불나사 축과 너트사이의 불 마찰로 인한 열이 발생하여 불나사 표면에 온도 상승으로 불나사가 열팽창하여 위치결정 정도 오차가 발생하게 된 것으로 생각된다.

현재 사용되고 있는 NC 제어장치 기능중 Pitch Error 보정기능은 피치에 보정값을 입력하고 Pitch Error 보정량을 수정하지 않으면 계속 같은 보정량을 실행하게 된다. 따라서 본 실험장치를 사용하여 실험중 데이터에서 알 수 있듯이 각각 진행 시간에 따라 위치결정 정도 오차량의 차이가 있으므로 현재 사용되고 있는 NC 제어 장치 기능중 Pitch Error 보정기능을 이용한 불나사 열변위량 보정방법은 불합리하다고 생각된다.

따라서 본 연구에서는 현재 NC 제어장치에서 많이 사용되고 있는 Pitch Error 보정량을 각각 시간 구간에 따라 Pitch Error 보정량을 다르게 실행할 수 있도록 설계된 보정 프로그램을 이용하여 Fig.2,3에서의 위치결정 오차량을 보정 프로그램에 각각 입력하여 동일한 방법과 조건으로 각 위치에서의 위치결정정도 오차를 Fig.5,6에 나타내고 있다.

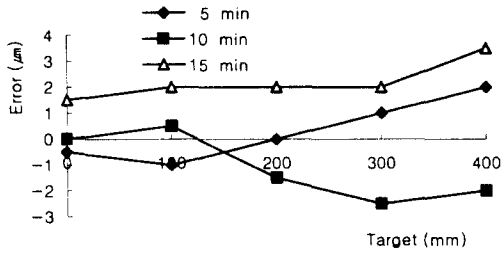


Fig. 5 The measured compensation of thermal displacement relative to the time after 5, 10, 15 min

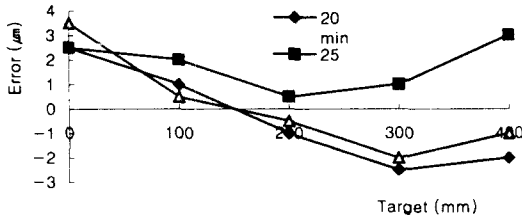


Fig. 6 The measured compensation of thermal displacement relative to the time after 20, 25, 30 min

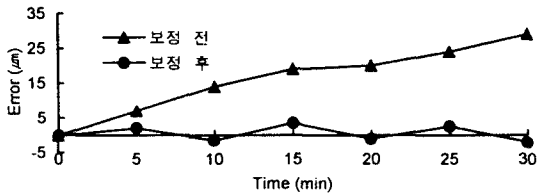


Fig. 7. The Measured Compensation of thermal displacement relative to the time

그림에서 각 위치에 따라 일정하게 위치결정 정도 오차가 상승하는 것과는 달리 보정후 위치결정 정도 오차량이 상승과 하락의 곡선을 나타내고 있는 것은 Pitch Error 보정량 입력 오차로 추정된다.

Fig.7은 볼나사 열팽창에 따른 위치결정 정도 오차량을 각 시간별로 보정전후의 위치결정 정도 오차량을 비교해 보았다. 보정전의 오차량은 15분에서 20 $\mu$ m, 30분에서 29 $\mu$ m을 나타내었고, 보정 프로그램을 적용하였을 경우 15분에서 2 $\mu$ m, 30분에서 6 $\mu$ m로 감소됨을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서 설계된 프로그램 적용시 30분에서 29 $\mu$ m의 위치결정 오차량이 발생하는 CNC 선반 서보

계의 오차량을 6 $\mu$ m 이내로 유지 시킬수 있었다.

## 5. 결론

볼나사의 온도 상승에 따른 위치결정정도 오차량을 실험에 의해 시간에 따른 오차량을 예측하고 그 값을 기초로 개발 프로그램을 적용해 볼나사 열변위 보정을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 항온 항습 (20 $^{\circ}$ C  $\pm$ 1) 조건에서 급이송속도 20 m/min로 연속 운전을 수행할 경우 볼나사의 열적 안정에 필요한 시간은 30분임을 알 수 있었다.

2) 1)의 조건으로 30분 이전에는 시간에 따른 열변위에 의한 위치결정 정도 오차량의 보정이 필요함을 알 수 있었다.

3) 1),2),3)의 결과를 기초로 하여 종래의 위치결정 정도 오차량(-400mm 부근) 29 $\mu$ m를 본 실험 연구에서 제시한 프로그램을 적용하여 6 $\mu$ m로 감소시킬 수 있었다.

## 참고문헌

1. Jiro Otsuka, Shigeo Fukada, A Study of Thermal Expansion of Ball Screw -In Case of Constant Preload-, JSPE, Vol. 50, No. 4, pp.646 - 651, 1984. 4
2. Toshio Sata, Yoshimi Takeuchi, Control of the Thermal Deformation of a Machine Tool(1st Report) -Rapid Stabilization of a Machine Tool before Working-, JSPE, Vol. 41, No. 6, pp.592 - 597, 1975. 6
3. Keiji Okushima, Yoshiaki Kakino, Thermal Deformation of Machine Tools(3st Report) -Effects of the Circulation of Fluids-, JSPE, Vol. 39, No. 2, pp.230 - 236, 1973. 2
4. Keiji Okushima, Yoshiaki Kakino, Thermal

Deformation of Machine Tools(1st Report)  
-Thermal Deformation of Column in Steady  
state-, JSPE, Vol. 38, No. 3, pp.49 - 54,  
1972. 3

5. Yoshiaki Kakino, Kazuaki Mori, A Study  
of Compensation of Thermal Displacement  
of the Ballscrew in NC Machine Tools,  
JSPE, Vol. 54, No. 9, pp.1753 - 1758, 1988.
6. Mitsuyasu Matsuo, Takeshi Yasui, A  
Method of Thermal Displacement  
Compensation for Machining Center by  
Temperatures Measured on the  
Machine (2nd Report) -Automatic  
Compensation Using an NC Controller  
Marketed-, JSPE, Vol.57, No.6, pp.1066 -  
1071, 1991.
7. Yamaguchi, Influence of Ball screws and  
Slide ways on Positioning Accuracy, NSK  
Technical Journal, No. 650, 1989
8. "FANUC series O-Mate for Lathe  
Operator's Manual" FANUC LTD. pp.240 -  
294 1988.
9. "Renishaw Linear Error Compensation  
User Guide" 1992
10. Renishaw Laser Calibration Software  
User Guide" 1992.