

CNC 선반에서 볼 나사 열변형에 따른 위치결정 정도 개선에 관한 연구

홍성오*, 조규재**, 김재열**

A Study on Improvement of Accuracy of Positioning Induced Thermal Deformation of the Ball Screw in CNC Lathe

Sung-Oh Hong*, Gyu-Jae Cho**, Jae-Yeol Kim**

Abstract

Thermal expansion of the ball screw can directly affect the accuracy of positioning along the travel axis in the semi-closed loop type CNC Lathe. In this paper, use of MACRO variables can make the thermal displacement of the ball screw estimated. Also, the estimated displacements of the ball screw are controlled by calculating the interval of pitch error rate in the Numerical Control(NC). Under the constant operating conditions, the thermal expansion of the ball screw was measured to confirm the effectiveness of the compensation method in the CNC Lathe. By using this method the results show that the thermal displacement of the ball screw could be reduced to 20% compared with ordinary method.

Keywords : CNC Lathe(CNC 선반), Ball Screw(볼 나사), Thermal Expansion(열팽창), Compensation(보정), Accuracy of Positioning(위치결정 정도), MACRO Variable(매크로 변수).

1. 서론

생산 가공기술의 향상과 더불어 정밀공작기계의 수요가 확대되고 있으며, 정밀공작기계의 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 보상과정이 없이는

* 조선대학교 대학원

** 조선대학교

가공 정밀도를 기대할 수 없다. 공작기계의 고강성화, 고정도화, 고속화를 추구함에 있어 정밀도가 높고 강성이 큰 볼 나사가 제작 사용되고 있다. 볼 나사는 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 볼 나사 열변위를 제거할 수 있는 폐쇄 회로 방식은 설치 및 가격 상승 등의 단점이 있으므로 일반적으로 반 폐쇄 회로 방식을 적용하고있으나, 최종 제어대상인 테이블에서 위치를 검출하기 때문에 볼 나사의 열변형이 그대로 남아있어 위치결정 정도에 영향을 끼칠 수 있다. 이 때문에 열팽창에 의한 열변위량을 줄이기 위하여 강성을 높이고, Backlash를 제거하며, 고정밀도를 유지할 수 있도록 볼 나사에 외압을 가하는 방법이 사용되고 있다. 그러나 이 방법은 나사 축과 너트사이의 마찰저항이 증가되어 볼 나사의 자체 온도상승의 문제를 피할 수 없다.

따라서 공작기계에서 볼 나사 발열량을 제어하는 방법으로 볼 나사의 1회전당 이동량을 크게 하거나, 볼 나사와 지지 베어링 예압의 적정화 등이 주로 사용되고 있는데, 한편으로 소프트웨어를 이용한 보상 방법 등이 활발히 연구되고 있다⁽¹⁻⁵⁾.

공작기계 볼 나사의 열변형과 보상법에 대하여 Yoshi-aki⁽⁶⁾ 등은 운전 중에 이송(Feed), 서보 모터의 전류 값을 이용한 볼 나사 열변위 보정에 대하여, Mitsuyasu⁽⁷⁾ 등은 기계의 온도상승 예측량으로 보정 기능을 이용한 열변위 기능을 연구하였으며, Yamaguchi⁽⁸⁾는 볼 나사의 열팽창과 위치결정 정도의 영향에 대하여 연구하였다. 그 외에도 볼 나사의 열팽창에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으나 아직 미흡한 상태이다. 따라서 본 논문에서는 CNC 선반의 볼 나사를 사용하여 볼 나사 열변위가 안정화되는 시간을 측정된 후 측정된 시간을 여러 구간으로 나누어 각 구간별로 볼 나사 변위량을 측정한다. 또한 측정 오차의 오류를 제거하고 열변위량을 예측하기 위해 Trend Removal 과정을 수행하고, 이들 변위량을 보정하기 위해, MACRO를 이용한 보정 프로그램을 적용하여 보정한 후 위치결정 정도를 보정 전과 비교 분석함으로써 볼 나사를 이송 기구로 사용하는 공작기계에서 볼 나사의 열변위가 안정화되기 전에 볼나사의 열팽창으로 인한 위치결정 정도를 개선하는 하나의 방안을 실험을 통해 찾고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 볼 나사 온도 상승

볼 나사는 서보 모터로 나사 축을 회전시켜 Nut를 왕복운동을 시킴으로써, 나사 홈과 강구와의 사이에 접선방향의 마찰저항에 의하여 나사 축은 온도가 상승된다. 볼 나사의 온도상승은 마찰에 의한 발열과 외부로의 방열이 일치 될 때 결정된다. 따라서 위치결정 정도가 중요한 공작기계에서는 이송기구에 사용되는 볼 나사의 열변위는 직접 정도저하에 영향을 미치므로 볼 나사 온도상승이 중요한 문제가 된다. 볼 나사 온도 상승의 식은 식(1)과 같다⁽⁸⁾.

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

여기서 θ : 볼 나사 온도 상승치 (°C)

Q : 단위시간의 발열량 (kcal/hr)

β : 단위시간, 단위온도차의 방열량
(kcal/hr · °C)

CM : 열 용량 (kcal/°C)

t : 운전 시간 (hr)

2.2 열변위량

축 이송계에 적용되는 볼 나사는 축 방향의 위치결정 정도가 공작기계의 이송에 따른 정도를 좌우하기 때문에 반경 방향의 열팽창은 무시되고 축 방향의 열팽창량만 고려된다. 볼 나사 열변위 ΔL 은 식(2)와 같다.

$$\Delta L = aL \int_0^L \theta(x) dx = aL\Delta\theta \quad (2)$$

여기서 a : 나사 축 재료의 선 팽창계수

$\Delta\theta$: 나사 축의 온도 상승치

L : 나사 축 길이

여기서 볼 나사의 열변위량을 줄이기 위해서는 식(2)로부터 볼 나사 온도 상승 값을 감소시켜야하며 이를 위해서는 식(1)로부터 방열량을 증가시키면 된다. 볼 나사의 회전에 따른 발열량 Q 는 식(3)으로부터 구할 수 있다⁽⁹⁾.

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

여기서 N : 볼 나사의 회전수(rpm)
 T : 마찰 토크 (kgf m)
 J : 일의 열당량 (427kgf.m/kcal)

따라서 발열량은 회전수와 마찰 토크에 비례하고 볼 나사에 의한 이송속도는 리이드와 회전수에 비례하므로 볼 나사의 리이드를 크게하여 회전수를 감소시키거나 적절한 예압으로 마찰 토크를 감소시켜야한다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험 장치

본 실험장치는 Fig.1과 같이 TAC(Thrust Angular Contact) ball bearing 2열 정면조합(DF)형을 사용하여, 볼 나사 너트와 조립오차에 의한 영향을 흡수하기 쉬운 양단지지로 구성하고 볼 나사 축과 Servo motor는 커플링으로 연결하였으며 정지와 구동은 프로그램을 작성하여 활용하였다. 열변위 실험은 최대 이송거리 [400mm] 로 하였고 이송범위를 초과할 경우에는 알람신호를 발생하도록 하기 위하여 DOG(switch touch block)를 부착하였으며 테이블에 리미트 스위치(limit switch)를 설치하였다. 구동중 양끝단의 정지시간을 2 sec로 설정하였는데 이는 테이블이 양끝단으로 이송 중 과부하가 발생하는 것을 방지하기 위함이다. 주위의 온도영향을 고려해 항온실 (20℃±1)에 실험장치를 설치했다.

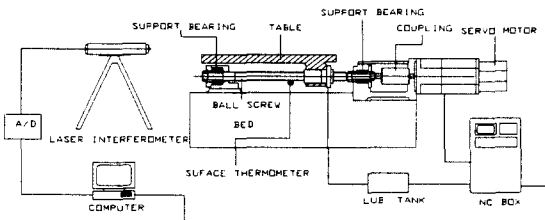


Fig. 1 Experimental set-up for the measurement

본 실험장치에 사용한 볼 나사는 누적대표 리드오차 (E)가 13μm이고 변동오차가 2π당 6μm인 C3등급이며 사양은 Table 1과 같다.

Table 1. Specification of the ball screw

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

3.2 실험방법

3.2.1 NC 제어 장치의 보정

보정 기능을 구현하는 방법 중의 하나인 Custom Macro B 언어가 있는데 이는 사용자가 자동 Cycle, Pattern 기능등 독자적인 프로그램을 작성하여 Memory에 등록하여 두고 Subprogram과 같이 필요할 때에 프로그램으로 호출할 수 있으며, 특히 변수, 연산지령, 제어지령을 응용해 사용자가 필요로 하는 기능 등을 나타낼 수 있다⁽¹⁰⁾.

먼저 이송거리 전구간에 있어서 n개로 등분하여 각각의 위치에서 변위량을 보정 할 수 있도록 구간을 설정하였다. 구간이 설정되면 30분간 테이블의 왕복운동 중에 2.5분 간격으로 12등분하여 각각의 구간을 MACRO 변수 #500부터 #511까지 설정하고 12구간을 기준으로 테이블 위치정도를 실측한 변위량을 MACRO 변수 #500부터 #511까지에 각각 입력하였다. 변수값의 경우 상기 시간에 따른 변수로써 제품, 절삭사이클 패턴 등에 의하여 각각 다르게 나타나게 된다. 따라서 제품별, 가공사이클 패턴에 따라 실측값을 입력해야한다. 또한 시간의 흐름에 따라 보정량이 다르기 때문에 여기에서는 5분간격으로 보정량을 변화시키기 위해 Table 2와같이 시간의 변화, MACRO 변수와 파라메타 번호와 일치시켰다. 각각의 시간에 대한 MACRO 변수는 5분 간격으로 설정하여 #100부터 #106까지 6등분하였고 MACRO 변수와 파라메타 관계는 Table 2와 같다.

Table 2. Sector division

NO	P. NO	MACRO VAR.	TIME(min)
1	1006	#101 (#530 + #500 - #511)	30
2	1005	#102 (#530 + #500 - #509)	25
3	1004	#103 (#530 + #500 - #507)	20
4	1003	#104 (#530 + #500 - #505)	15
5	1002	#105 (#530 + #500 - #503)	10
6	1001	#106 (#530 + #500 - #501)	5

3.2.2 열변위량 측정방법

본 실험장치는 레이저 간섭계의 설치가 용이하게 하기 위하여 고정 Jig를 사용하여 테이블과 볼 나사를 수평으로 설치하였다. 작성된 프로그램에 따라 실험장치를 운전하였으며 온도와 열변위량을 측정하였다. 볼 나사를 사용하는 정밀공작기계등은 가공작업을 실행할 때 볼 나사의 동작이 일정하게 유지되지 않고 간헐적으로 불규칙하게 동작을 하지만, 본 실험에서는 일정한 구간범위 안에서 20m/min의 동일한 급이송속도로 왕복운전을 반복실행하였다.

먼저 NC 장치에서 원점 복귀를 실시하고, 자동 실행프로그램을 적용하여 테이블을 5분 간격으로 왕복 이송운전을 시킨 후 측정을 위하여 일시운전을 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⁽¹¹⁻¹²⁾. 볼 나사의 표면의 온도는 온도가 가장 높게 상승하는 볼 나사의 중앙에 접촉식 표면 온도계를 사용하여 온도를 측정하였다. 이로부터 볼 나사의 온도변화에 따른 열변위량을 결정할 수 있었다. 이를 기초로 온도 상승에 따른 열변위량의 데이터를 MACRO를 사용하여 시간에 따른 열변위량의 데이터로 입력시켜 보정프로그램을 작성하였다. 이 보정 프로그램을 적용하고 동일한 방법으로 테이블을 5분 간격으로 공회전 시킨 후 이송구간을 4등분한 각 지점의 열변위량을 측정하였다.

3.2.3 열변위량 측정

급이송속도의 변화에 따른 열변위량 중 레이저 간섭계(Laser Interferometer)의 설치, 그리고 볼 나사의 피치 오차 보정의 잘못으로 인하여 발생할 수 있는 측정오차의 오류를 제거하기 위해, 측정된 열변위량의 각도오차 성분을 제거하는 Trend Removal 과정을 수행하였다. 우선 가공과 급이송 조건을 고려해 다음 조건(5,10,15m/min)으로 각각의 위치에서 열변위량을 측정하고 이 측정값을 근거로 Trend Removal 과정을 측의 열변위량 측정값에 적용시키면 Table 3과 같이 급이송속도에 따른 각각의 위치에서 Error model를 얻을 수 있다. 여기에서 구한 측의 열변위량 오차성분을 측정된 열변위량에서 제외하면 그 열변위량 중 순수하게 교류성분의 열변위량을 구할 수 있으며 이와같은 과정이 열변위량 오차 성분의 Trend Removal 과정이다.

급이송속도의 변화에 따라 기계의 형상에 지배받는 열변위량 중 교류성분 오차규명은 Table 3과 같은 3차 오차모형을 이용할 수 있다. 이 경우 수학적 모형화에 의한 국부적인 위치에서 발생할 수 있는 모형화 오차는 Figs.2-4에서 볼 수 있듯이 전체 교류성분 열변위량의 50%이내에서 규명된다. 이와 같은 오차모형을 이용하면 몇점에서의 열변위량 측정만으로도 열변위량을 명확히 규명할 수 있다. 여기에서 급이송속도(5,10,15m/min)로 Trend Removal 과정을 검증해보고 본 실험장치는 머시닝센터와는 달리 CNC 선반으로 가공시간이 적고 외경가공의 경우 가공시작점의 위치결정 정도가 가공정도를 결정하기 때문에 본 논문의 열변위량 측정과 보정을 본 실험장비의 급이송속도인 20m/min로 선정하여 실험을 수행하였다.

Table 3. 3rd order error model relative to rapid traverse

Rapid traverse (m/min)	Position (mm)	Error model
5	100	$-5.555D-02X^3+0.7857143X^2+(-3.444444X)+2.571429$
	200	$2.777D-02X^3+(-0.1547619)X^2+0.7698413X+5.3809$
	300	$-2.777D-02X^3+0.2857143X^2+(-0.6150793X)+17.28572$
	400	$-0.111D-02X^3+1.535714X^2+(-6.281746X)+19.71428$
10	100	$-0.111D-02X^3+1.428571X^2+(-5.603175X)+4$
	200	$-2.777D-02X^3+0.4285714X^2+(-1.329365X)+5$
	300	$3.571429D-02X^2+3.571429D-2X+9.857142$
	400	$-2.777D-02X^3+0.3095238X^2+(-0.734127X)+13.42857$
15	100	$8.333D-02X^3+(-1.940476X^2)+11.3333X+(-10.28571)$
	200	$-2.777D-02X^3+0.2857143X^2+(-0.6150793X)+17.28572$
	300	$-3.888D-02X^3+4.9166677X^2+(-16.26587X)+35.71429$
	400	$-0.472D-02X^3+5.714286X^2+(-17.24206X)+39.71429$

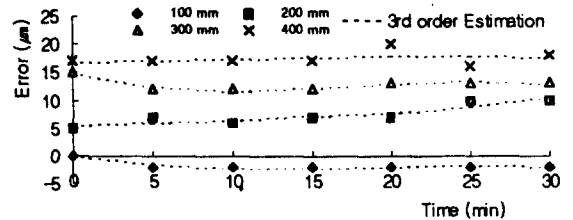


Fig. 2 The measured thermal displacement relative to the time during the rapid traverse rate 5m/min

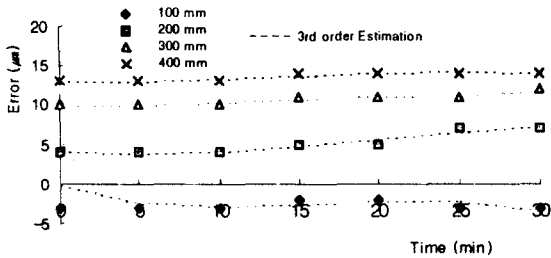


Fig. 3 The measured thermal displacement relative to the time during the rapid travers rate 10m/min

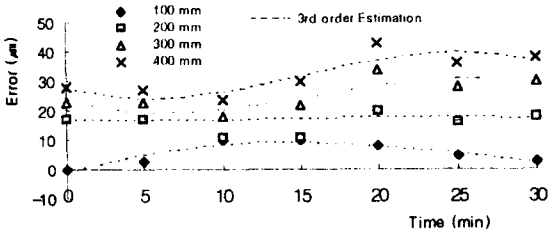


Fig. 3 The measured thermal displacement relative to the time during the rapid travers rate 15m/min

4. 실험 결과 및 고찰

Fig.1과 같은 실험장치를 사용하여 20℃의 항온조건에서 CNC 선반에서 사용하는 볼 나사를 20m/min의 급이송속도로 직선 왕복운동을 시켜 열변위량을 측정된 결과는 다음과 같다.

Fig. 5는 테이블 이송작업 시간에 따른 볼 나사의 온도 변화를 나타낸 결과이다. 이때 시간의 변화에 따른 볼 나사의 표면 온도변화를 나타내고 있다. 그리고 시간이 진행됨에 따라 일정한 상태로 상승(9℃)됨을 알 수 있었고, 30분 이후(29℃)에서 안정화됨을 알 수 있었다.

이와같이 위치결정 정도 오차가 발생하는 원인은 볼 나사 축과 너트사이의 볼 마찰로 인한 열이 발생하여 볼 나사 표면에 온도 상승으로 볼 나사가 열팽창하여 위치결정 정도 오차가 발생하게 된 것으로 생각된다. 이 Fig. 5와 같은 조건으로 볼 나사의 열변형이 안정화된 시간을 5분 간격으로 등분한 시간과 100mm 간격으로 등분한 이동 구간에서의 측정된 결과를 근거로 하여 앞에서 검증된 Trend

Removal 과정을 수행한 열변형은 Figs. 6-7과 같은 결과를 얻었다. Figs. 6-7에 나타난 바와 같이 10 분에서 오차량 15 μ m, 30분에서 오차량 29 μ m이 됨을 알 수 있었다.

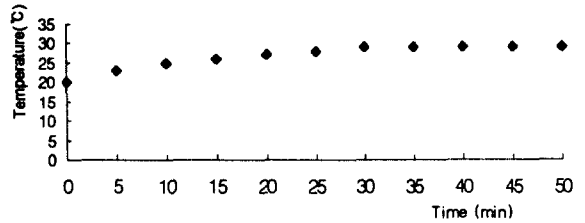


Fig. 5 The measured temperature relative to the time

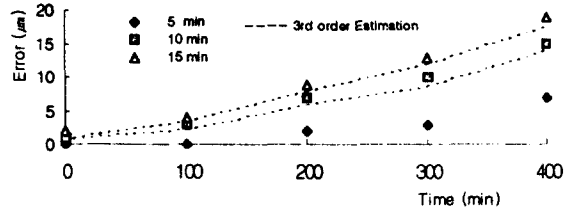


Fig. 6 The measured displacement relative to the time after 5, 10, 15min

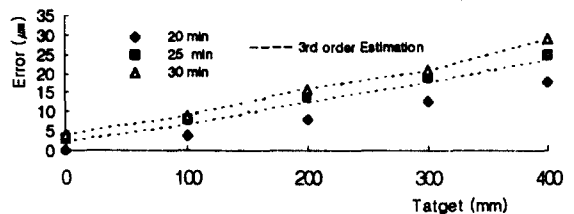


Fig. 7 The measured displacement relative to the time after 20, 25, 30min

현재 사용되고 있는 NC 제어장치 기능 중 Pitch Error 보정 기능은 피치에 보정값을 입력하고 Pitch Error 보정량을 수정하지 않으면 계속 같은 보정량을 실행하게 된다. 따라서 본 실험을 통해서 얻어진 실험 데이터에서 알 수 있듯이 각각 진행 시간에 따라 위치결정 정도 오차량의 차이가 있으므로 현재 사용되고 있는 NC 제어 장치 기능 중 Pitch Error 보정 기능을 이용한 볼 나

사 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 Figs. 6-7에서의 위치결정 오차량을 보정 프로그램에 각각 입력하여 동일한 방법과 조건으로 각 위치에서의 위치결정 정도 오차를 Figs. 6-7에 나타내고 있다. Figs. 8-9에서와 같이 400mm 구간에서 10분에서 15분에서 오차량 $2.5\mu\text{m}$, 30분에서 오차량 $6\mu\text{m}$ 으로 나타내고 있다.

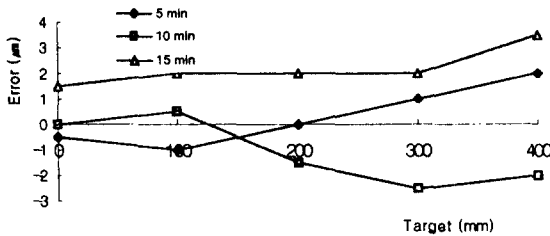


Fig. 8 The measured compensation thermal displacement relative to the time after 5, 10, 15min

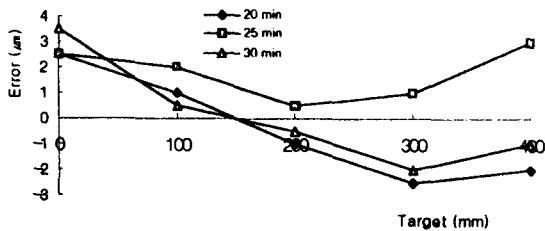


Fig. 9 The measured compensation thermal displacement relative to the time after 20, 25, 30min

Figs. 8-9와 같이 그림에서 각 위치에 따라 일정하게 위치결정 정도 오차가 상승하는 것과는 달리 보정 후 위치결정 정도 오차량이 상승과 하락의 곡선을 나타내고 있는 것은 Pitch Error 보정량 입력 오차로 추정된다.

이 결과치를 검토해 보기 위하여 Fig. 10과 같이 나타냈다. Fig. 10은 불 나사 열팽창에 따른 위치결정 정도 오차량에 대하여 진행 시간별로 보정 전과 후를 비교해

보았다. 보정 전의 오차량은 15분에서 $20\mu\text{m}$, 30분에서 $29\mu\text{m}$ 을 나타내었고, 보정 프로그램을 적용하였을 경우 15분에서 $2\mu\text{m}$, 30분에서 $6\mu\text{m}$ 로 감소됨을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서 설계된 프로그램 적용시 30분에서 $29\mu\text{m}$ 의 위치결정 오차량이 발생하는 CNC 선반 서보계의 오차량을 $6\mu\text{m}$ 이내로 유지시킬 수 있었다.

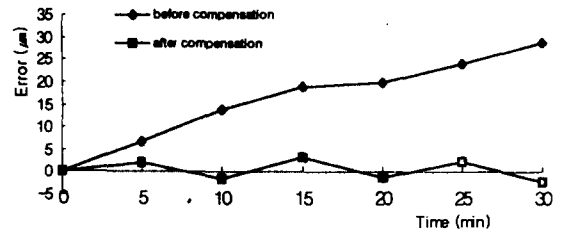


Fig. 10 The measured compensation thermal displacement relative to the time

5. 결론

불 나사의 온도 상승에 따른 위치결정 정도 오차량을 실험에 의해 시간에 따른 오차량을 예측하고 그 값을 기초로 개발 프로그램을 적용해 불 나사 열변위 보정을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 항온 ($20^{\circ}\text{C} \pm 1$) 조건에서 급이송속도 20 m/min 으로 연속운전을 수행할 경우 불 나사의 열적 안정에 필요한 시간은 30분임을 알 수 있었다.
- 2) 1)의 조건으로 30분 이전에는 시간에 따른 열변형에 의한 위치결정 정도 오차량의 보정이 필요함을 알 수 있었고, 급이송 변화에 따른 오차 모형을 유도, 검증하여 규명 할 수 있었다.
- 3) 실험 결과를 기초로 하여 종래의 위치결정 정도 오차량(400mm지점) $29\mu\text{m}$ 를 본 실험 연구에서 제시한 프로그램을 적용하여 20%로 감소시킬 수 있었다.

후기

본 논문은 1996년도 조선대학교 학술 연구비 지원을 받아 연구되었음.

참 고 문 헌

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.
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.
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.
4. Keiji Okushima, Yoshiaki Kakino, "Thermal Deformation of Machine Tools(1st Report)- Thermal Deformation of Colum in Steady state", JSPE, Vol. 38, No. 3, pp. 49 - 54, 1972.
5. 홍성오외 3인, "열변형에 따른 가공정밀도 개선에 관한 연구", 한국공작기계학회 98년도 춘계학술대회 논문집, pp. 263-268.
6. Yoshiaki Kakino, Kazuaki Mori, "A Study of Compensation of Thermal Displacement of the Ball Screw in NC Machine Tools", JSPE, Vol. 54, No. 9, pp. 1753 - 1758, 1988.
7. 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.
8. Yamaguchi, "Influence of Ball Screws and Slide Ways on Positioning Accuracy", NSK Technical Journal, No. 650, 1989.
9. 二官瑞穂, "ボールねじの發熱と對應策", 応用機械工學, No. 4, pp. 98 - 103, 1987.
10. FANUC LTD, "FANUC series O-Mate for Lathe Operator's Manual", pp. 240 - 294, 1988.
11. Renishaw LTD, "Renishaw Linear Error Compensation User Guide" 1992.
12. Renishaw LTD, "Renishaw Laser Calibration Software User Guide" 1992.