

CNC 선반에서 BALL SCREW의 열변위 보정에 관한 연구

A Study of Compensation of Thermal Displacement of the Ball Screw in CNC Lathe

홍 성 오* (조선대, 원) 김 병 천 (조선대학교 기계공학과)

Key words : CNC LATHE, Ball Screw, Thermal expansion compensation, positioning accuracy, macro variable

ABSTRACT

Thermal expansion of ball screw in the semi-closed loop type CNC LATHE introduces positioning errors directly along the travelling the axis. In this paper the thermal displacements of the ball screw were estimated by using macro variable. The estimated displacements of the ball screw were given to the NC in the form of pitch error compensation data into time interval. The thermal behaviours of the ball screw of the CNC LATHE under the constant driving conditions were measured to examine the effectiveness of the compensation method. The results showed that thermal displacements of the ball screw could be maintained less than 6 μ m positioning accuracy while using this compensation

1. 서 론

최근 공작기계가 고급화 되고 자동화 됨에 따라 점점 높은 기공 정밀도가 요구되고 있으며 특히 CNC 공작기계는 운전의 무인화를 가능하게 하지만 일단 운전을 시작하면 운전자가 제어할 수 없기 때문에 작업중에 발생하는 열변위와 공구마모에 대한 보상과정이 없는 가공 정밀도를 기대할 수 없다.¹⁾

공작기계에 사용되는 볼스크류는 미끄럼 마찰을 구름마찰로 변환시켜 이송마찰과 마모량을 줄여 정밀도와 수명을 향상시킨 동력 전달용 나사로서 구동 토오크가 작으므로 공작기계의 정밀 위치 결정에 많이 이용되고 있다.

CNC 공작기계의 서보기구에 볼스크류의 열변위를 제거할 수 있는 폐쇄 회로 방식은 원가가 높은 단점이 있으므로 일반적으로 반 폐쇄 회로

방식을 적용하고 있으나 모터 축이나 볼스크류 축 등의 최종 제어대상인 테이블 앞에서 위치를 검출하기 때문에 볼스크류의 열변위가 그대로 남아있어 위치결정 오차가 나타날 수 있다.이 때문에 열팽창에 의한 열변위량을 줄이기 위하여 강성을 높이고 백래쉬를 제거할 수 있으며 고정밀도를 유지할 수 있는 볼스크류에 예압을 가하는 방식이 사용되고 있다.

볼스크류의 열변위는 최적의 예압량을 주고 적절한 윤활제를 선정하여 사용함으로써 열변위를 줄일 수 있으나 완전한 방지는 되지 못한다.²⁾

CNC 공작기계에서 볼스크류 열변위에 대하여 가공물의 정밀도를 유지하기 위한 방법으로는 열팽창 계수가 작은 새로운 재료를 이용하는 방법과 온도변화에 안정된 구조를 갖도록 설계하는 방법이 주로 사용되고 있는데 소프트웨어를

이용한 보상 방법이 연구되고 있다.³⁻⁴⁾

CNC 공작기계의 볼스크류의 열변형과 보상법에 대하여 J.K.Park 등은 유한차분법을 사용하여 예압과 회전 속도에 따른 볼스크류의 열팽창과 온도 분포에 대하여 연구하였으며⁵⁾ Yoshiaki 등은 운전중에 Feed, 서보 모터의 전류값을 이용하여 볼 스크류 열변위 보정에 대하여 연구하였고⁶⁾ Mitsuyasu 등은 기계의 온도상승을 예측하여 그 량으로 보정기능을 이용한 열변위 기능을 연구하였다.⁷⁾

본 논문에서는 국내에서 상용화 되고 있는 CNC 선반의 볼스크류를 이용하여 볼스크류 열변위가 안정화되는 시점까지의 시간을 구분하고 그 시간대의 열변위량을 MACRO를 이용한 프로그램을 설계하여 Pitch Error보정을 실시하므로 볼스크류 열변위량을 최소화시켜 공작기계의 가공 정밀도 향상에 기여 하고자 한다.

2. 이론 해석

2.1 볼스크류 온도 상승

볼스크류가 축방향하중을 받으면서 축을 회전시켜 Nut를 왕복운동시키면 나사축은 온도가 상승되어서 열변위가 발생한다. 이때 나사축과 鋼球와의 사이에는 축방향하중에 의한 접선방향의 마찰저항 F에 의하여 나사축은 온도가 상승하는데 외부와 나사축은 온도차에 의하여 나사축 표면으로부터 방출된다. 따라서 나사축은 나사축의 발열량과 방열량 차이만큼 온도가 상승하게 되며, 시간이 경과 함에 따라 온도가 일정하게 유지되는데, 실제의 기계에서 급이송으로 사용되는 시간은 약 10% 전후로 짧기 때문에 온도 상승치는 대부분 작은 값이 된다.

$$\theta_s = \frac{FV}{\alpha JA} (1 - \exp(-\frac{\alpha \Delta t}{CM}))$$

여기서

θ_s : Ball screw 온도 상승치. (°C)

F : Screw 홈면에 작용하는 접선 방향의 마찰력. (kg)

V : Screw 의 접선방향의 속도 (m/h)

J : 열의 일당량 (427 kgm/Kcal)

Λ : 방열면적 (M²)

t : 운전 시간 (h)

α : Ball screw 표면 열전달율 (Kcal/M²h°C)

CM : Ball screw의 열용량(Kcal/°C)

2.2 열변위량

일반적으로 CNC 공작기계에 사용되는 볼 스크류는 세장비(스크류 축 길이 / 축 직경, 본 논문의 경우 950/32 = 29.7)가 크고 축 이송 시스템에 적용되는 볼 스크류는 구조적인 면에서 축 방향의 위치결정 정도에 CNC 공작기계의 이송에 따른 정도가 좌우되기 때문에 반경 방향의 열팽창은 무시되고 축 방향의 열팽창량만 고려된다.

볼 스크류는 단순 팽창의 경우로써 열변위 ΔL 은 다음 식으로 구할 수 있다.

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

여기서 β 는 스크류 재료의 선팽창계수, $\Delta \theta$ 는 스크류 축의 온도 상승치이고 L는 스크류 축 길이이다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험 장치

실험에는 Fig.1과 같이 CNC 선반 Z축을 사용하였고 주위 온도 변화량을 최소화하여 정확한 볼 스크류의 열 변위량을 측정하기 위하여 항온실(20°C부근)에 실험 장치를 설치 하였으며 본 실험 장치의 주요 사양은 다음과 같다.

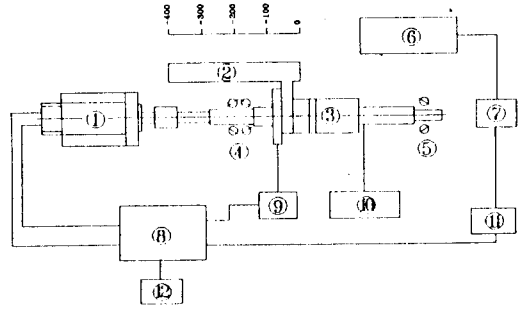
- 이송거리 : 440mm

- 서보 모터 : AC 0.9KW

- 볼 스크류 치수 : $\phi 32$ mm p12mm 전장 950mm

- 양지지 베어링 : TAC. BALL BEARING

- 윤환 : 강제 윤환 주입식



- | | |
|-------------------------|------------------------------|
| 1. AC servo motor | 7. IBM-PC |
| 2. Table | 8. NC control box |
| 3. Ball screw | 9. Lub pump |
| 4. Back bearing | 10. Surface-type thermometer |
| 5. Front bearing | 11. printer |
| 6. Laser interferometer | 12. Power source |

Fig.1 Experimental set-up for the measurement of thermal displacement

볼 스크류는 고정 - 지지 방식으로 고정축 베어링은 복열 TAC. ball bearing 정면조합과 지지축 베어링은 단열 TAC. ball bearing 으로 지지 하였다.

본 실험 장치에서 고정 및 지지점에 TAC. ball bearing을 적용하였는데 이는 이송기구가 고정 밀도를 요구하고 레이디얼 하중 보다는 대부분의 하중이 축방향으로 가해지며 레이디얼 하중도 흡수할 수 있기 때문이다.

볼 스크류 축은 AC Servo Motor를 연결 하였고 정지와 구동은 측정용 프로그램을 작성하여 실험에 활용 하였다.

볼 스크류의 너트 이송범위는 본 실험 장치의 최대 이송 거리를 활용하였고 최대 이송 거리를 오버하였을때 NC에서 Alarm 신호를 발생시키기 위하여 리미트 스위치를 설치 하였다.

볼 스크류 너트의 운전중 양단의 휴지 시간을 2 sec로 설정 하였는데 이는 볼 스크류 너트가 양단으로 이동중 휴지 시간이 없으면 실험 장치

에 과부하를 발생시킬 수 있고 AC Servo Motor에 Alarm이 발생된 업리가 있기 때문이다.

3.2 측정

측정은 볼 스크류의 온도 상승에 따른 볼 스크류의 열변위량을 측정하였다.

볼 스크류 너트는 자동 실행 프로그램에 의하여 5min 동안 반복 운전 직후 100mm구간 간격으로 왕복3회를 측정할 수 있는 측정용 프로그램을 활용하여 레이저간섭계 (laser interferometer)와 여기에서 출력되는 측정값을 분석하는 Soft Ware를 이용하여 측정하였다.

이거서 볼스크류의 열변위량은 측정값의 신뢰도를 높이기 위하여 3회 측정하여 평균값을 취하였다.

정확한 볼스크류 열변위량을 측정하기 위하여 레이저 간섭계(Laser Interferometer)를 사용하였는데 그이유는 산업현장에서 길이 측정의 표준장비로서 수심미터의 거리도 신속 정확하게 측정할 수 있을 뿐만아니라 길이 측정 오차도 $\pm 0.1\text{ppm}$ 정도를 유지할 수 있으며 PC 및 각종 표시기, 제어기, Safe Ware 등과 연결 사용할 수 있기 때문이다.^{8)~9)}

3.3 NC 제어 장치의 보정방법

최근 NC 제어 장치는 다양한 보정 기능을 보유하고 있다. 다양한 보정 기능중 Custom Macro는 사용자가 독자적인 프로그램을 작성하여 (자동 Cycle, Patten 기능등) Memory에 등록하여 두고 Sub Program과 같이 필요할 때에 프로그램으로 호출할 수 있으며 최대 특징으로 변수, 연산지령, 제어지령을 응용해 사용자가 필요로 하는 기능등을 표현할 수 있다.¹⁰⁾

이러한 기능을 이용해 볼스크류 열변위량을 예측하여 Pitch Error 보정 기능을 수행하고 볼 스크류의 열변위량을 보정하면 열변위에 의한 위치결정 정도 오차를 최소화하여, 연속 가공 정밀도를 향상 시킬수 있다.

CNC 선반의 경우 일반적으로 X,Z축 제어를 하는데 본 실험에서는 Z축을 제어하였다. X축의

경우 이송거리가 짧으므로 열변위량이 적어 실험적 DATA를 명확하게 하기 위해 Z축을 선택하였다.

Table 직선 왕복 운동 시간 30min을 2.5min 구간으로 나누어 각각 시간에 따른 Pitch Error MACRO 변수를 #500-#511로 설정하였는데 본 실험에서 30min으로 직선 왕복 운동시간을 정한 이유는 항온 항습 조건(20°C부근)에서 30min 이후 볼스크류 열상승량이 안정화 되기 때문이다.

볼스크류 열변위 구간 #500-#511을 기준으로 Table 3과 같이 #100-#104(구간 0-400mm)로 예측된 변위량을 #500-#511로 입력하였다.

3.4 측정 방법

Table 1의 Parameter를 기본으로 실험용으로 작성된 프로그램을 이용해 기계를 운전하는 동안 볼스크류의 온도와 열변위량을 측정한다.

현재 상용되고 있는 CNC 선반의 경우 일반적으로 BEI를 정사구조로 설계하기 때문에 측정 장비인 레이저 간섭계(Laser Interferometer)를 설치하는데 불합리하다.

따라서 본 실험 장치는 모든 기구를 설치한 후 고정 JIG를 이용해 레이저 간섭계(Laser Interferometer) 설치가 용이하도록 수평으로 설치하여 측정하였다.

실제 최종 소비자들은 제품을 가공하기 위하여 작업을 실행할 때는 볼스크류의 동작이 일정하게 유지되지 않고 간헐적으로 불규칙하게 운동을 하지만 본 실험에서는 정확한 볼스크류의 열변위를 추적하기 위하여 일정한 구간 범위 안에서 동일한 속도로 왕복운전을 반복 실행하였다.

먼저 NC 제어 장치에서 Z축 원점 복귀를 실시하고 5min동안 왕복 직선 운동을 연속적으로 실시한 후 볼스크류 표면온도를 측정하고 레이저 간섭계(Laser Interferometer)로 0, -100mm, -200mm, -300mm, -400mm 구간의 볼스크류 열변위량을 3회 왕복 측정하여 IBM-PC로 연결 왕복3회 동안 측정된 DATA의 평균값을 열변위량으로 결정하고 30min까지 반복하여 실시한다. 초기 상태에서 레이저 간섭계(Laser Interferometer)를 이용해 Pitch Error 보정을 실시한 후 같은 실험

방법을 통해 실시하였다.

Table 1 Compensation Parameter List of NC Controller (FANUC SYSTEM O-TC)

PARAMETER	FUNCTION
0011	Pitch Error Compensation Magnification
0756	1st Work Zero-Point Offset Amount Of X-Axis In Sequence
0757	1st Work Zero-Point Offset Amount Of Z-Axis In Sequence
1000	X-Axis Servo Point Of Pitch Error Compensation
1001 - 1128	Setting Of Pitch Error Compensation Amount For X-Axis
2000	Z-Axis Servo Point Of Pitch Error Compensation
2001 - 2128	Setting Of Pitch Error Compensation Amount For Z-Axis
PC PARAMETER	FUNCTION
D0420	Setting Of Servo Traver Time For X-Axis
D0425	Setting Of Servo Stop Time For X-Axis
D0452	Thermal Displacement Amount Counter

Table 2 MACRO VARIABLE

Setting of Pitch data : #500, #501 - #511

NO	1	2	3	4
VAR	2.5min #500	5min #501	7.5min #502	10min #503
NO	5	6	7	8
VAR	12.5min #504	15min #505	17.5min #506	20min #507
NO	9	10	11	12
VAR	22.5min #508	25min #509	27.5min #510	30min #511

Table 3 구간 등분

NO	1	2	3	4	5
VAR	P.N01005 #100	P.N01004 #101	P.N01003 #102	P.N01002 #103	P.N01001 #104

4. 실험 결과 및 고찰

Fig.2은 항온항습 조건에서 실험기구장치의 Z축 최대 급이송 속도를 20 m/min로 하였다. 이때 Z축 최대 급이송 속도 20 m/min 으로 하고 NC Control Box의 조작 패널에서 Override Mode를 100%로 설정하여 실험용 프로그램에 의해 연속 반복 급이송 속도로 실험을 진행하여 0, -100, -200, -300, -400mm 위치에서 위치결정 정도를 분석 할 수 있는 소프트웨어를 이용하여 1)실험 시작 5분후, 10분후, 15분후의 위치결정 정도를 나타낸다.

Fig.2에서는 실험 시작 시간에 따라 1)실험 시작 5분후에는 6.5 μm, 10분후에는 15 μm, 15분후에는 19 μm의 위치결정 정도 오차가 발생하였다. 이때 볼스크류의 표면온도 변화는 1)실험 시작 5분후에는 23 ℃, 10분후에는 25℃, 15분후에는 26℃의 온도가 상승하였다.

여기에서 위치결정 정도 오차가 발생하는 원인으로서는 실험기구 진행중 볼스크류 축과 너트 사이의 불 마찰로 인하여 열이 발생하여 볼스크류 축 표면에 온도 상승으로 볼스크류가 열팽창하여 위치결정 정도 오차가 발생하게하는 주원인으로 추정된다.

Fig.3은 Fig.2와 같은 방법과 조건으로 진행하여 1)실험 시작 20분후, 25분후, 30분후의 위치결정 정도를 나타낸다.

실험기구 진행 시간에 따라 1)실험 시작 20분후 20 μm, 25분후 25 μm, 30분후 30 μm의 위치결정 정도의 오차가 발생되었다. 이때 볼스크류 축 표면온도는 1)실험 시작 20분후 27℃, 25분후 28℃, 30분후 29℃의 온도가 상승하였다. 여기에서 볼스크류의 열팽창에 따라 테이블에 위치결정 정도 오차가 나타난것을 알 수 있다. 따라서 Fig.2와 Fig.3에서 볼스크류 열팽창에 따라 테이블 위치결정 정도오차는 실험 진행 시간에 따른 오차량을 실험을 통하여 알 수 있었다.

현재 상용되고 있는 NC 제어장치기능중 Pitch Error 보정기능은 피치에 보정값을 입력하고 Pitch Error 보정량을 수정하지 않으면 계속 같은 보정량을 실행하게 된다. 따라서 본 실험기구 진행중의 실험 데이터에서 알수 있듯이 각각 진행 시간에 따라 위치결정 정도 오차량에 차이가 있으므로 현재 상용되고 있는 NC 제어 장치 기능중 Pitch Error 보정기능을 이용한 볼스크류 열변위량 보정방법은 불합리하다.

따라서 본연구에서는 현재 NC 제어장치에서 많이 사용되고 있는 Pitch Error 보정량을 각각 시간 구간에 따라 Pitch Error 보정량을 다르게 실행할 수 있도록 설계된 볼스크류 열변위량 보정 프로그램으로 Fig.2와 Fig.3에서의 위치결정 정도 오차량을 볼스크류 열변위량 보정 프로그램에 각각 입력하고 같은 시간(5, 10, 15, 20, 25, 30min)과 위치(0, -100, -200, -300, -400mm)에서 실험를 수행한 각 위치에서의 위치결정 정도 오차를 Fig.4와 Fig.5에 나타내고 있다.

Fig.4에서는 1)실험 시작 5분후 2 μm, 10분후 2 μm, 15분후 2 μm의 위치결정 정도 오차량을 나타내고 있다. 그림에서 각 위치에 따라 일정하게 위치결정 정도 오차가 상승하는 것과는 달리 보정후 위치결정 정도 오차량이 상승과 하락의 곡선을 나타내고 있는것은 Pitch Error 보정량 입력 오차로 추정된다. 이때 볼스크류 표면온도는 1)실험 시작 5분후 22 ℃, 10분후 25 ℃, 15분후 26 ℃로 상승하였다.

Fig.5은 Fig.4와 동일한 조건으로 1)실험 시작 20분후 3 μm, 25분후 2 μm, 30분후 6 μm의 위치결정 오차를 나타내고 있다. 볼스크류 열팽창에 따른 위치결정 정도 오차량을 각 시간으로 구분하여 Pitch Error 보정을 실시하므로 1)실험 시작 5분후 6.5 μm -> 3 μm, 10분후 15 μm -> 3 μm, 15분후 19 μm -> 3 μm, 20분후 20 μm -> 3 μm, 25분후 19 μm -> 3 μm, 30분후 30 μm -> 6 μm으로 -400mm위치에서 볼스크류 열팽창에 따른 테이블의 위치결정 정도 오차량을 감소 시킬수 있었다.

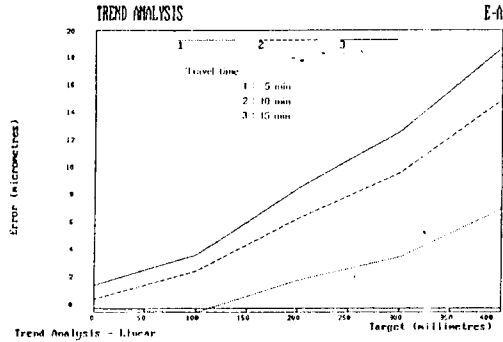


Fig.2 The measured thermal displacement at Z 0, -100, -200, -300,-400mm relative to the time after 5, 10, 15 min.

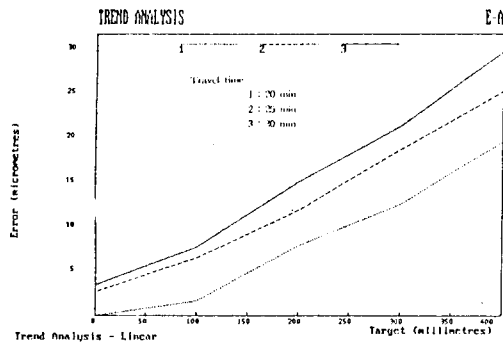


Fig.3 The measured thermal displacement at Z 0, -100, -200, -300,-400mm relative to the time after 20, 25, 30 min.

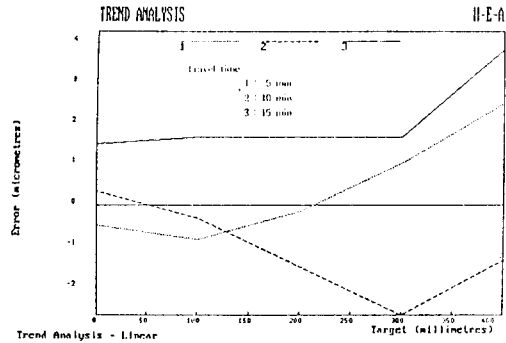


Fig.4 The measured compensation of thermal displacement at Z 0, -100, -200, -300, -400mm relative to the time after 5, 10, 15 min.

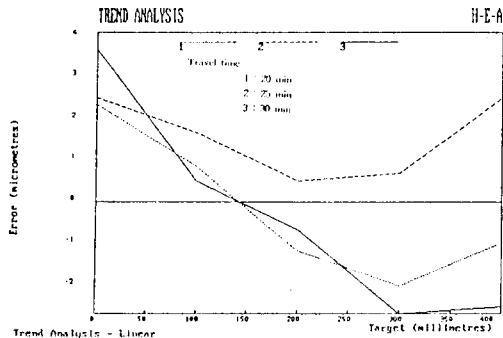


Fig.5 The measured compensation of thermal displacement at Z 0, -100, -200, -300, -400mm relative to the time after 20,25,30 min.

5. 결 론

CNC 선반에서 급이송속도 20m/min로 운전하여 볼스크류의 열변위량을 실험을 통해 값을 설정한 후 그 값을 기초로 개발 프로그램의 Pitch Error 보정기능을 사용해서 볼스크류 열변위 보정을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1)항온 항습 (20℃ 부근) 조건에서 급이송속도 20m/min로 30min 동안 연속 운전을 수행할 경우 기계 시작 30min 동안 Ball screw 열변위 보정이 필요함을 알수 있었다.

2)CNC 선반에서 운전 수행중 열변위에 의한 위치결정 정도 오차를 운전 시간에 따라 보정 구간 보정이 필요함을 알수 있었다.

3)1),2)의 결과를 기초로 하이 종래의 위치결정 정도 오차량(-400mm 부근) 30um를 본 연구에서 제시한 프로그램을 적용하여 6um로 감소시킬 수 있었다.

참고문헌

1. 李 奉珍, 最新 工作機械講義, 技術情報, 1993.
2. 非澤實, ボールねじとその應用技術, 工業調査會, 1990.
3. 朴 俊浩, 정민측정시스템공학, 야정문화사, 1993.
4. J.B.Bryan, R.R.Donelson, and E.R.Meclure : SME paper, MR 27 - 138, 1972.
5. 정 성중, 박정균, "유한차분법을 이용한 볼스크류 시스템의 열팽창 해석" 한국정밀공학회지, 제9권, 제4호, pp.44-57, 1992.
6. 垣野義昭 등, "NC工作機械におけるボールねじの熱變位補正", 精密工學會誌, Vol.54, No.9, pp.1753 - 1758, 1988.
7. 松尾光恭 등, "マシニングセンタの溫度分布測定にとる熱變位補正(第2報)" 精密工學會誌, Vol.57, No.6, pp.1066 - 1071, 1991.
8. "Renishaw Liner Error Compensation User Guide" 1992
9. "Renishaw Laser Calibration Software User Guide" 1992
10. 韓國 FANUC 技術研修所資料 CUSTOM MACRO 코스. 1988.