

열변형에 따른 가공 정밀도 개선에 관한 연구

A Study of Improvement of Machining Accuracy Induced Thermal Deformation

홍 성오, 정 성택(조선대 대학원), 조 규재(조선대), 전 언찬(동아대)

Abstract

Development of high speed feed drive system has been a major issue for the past few decades in machine tool industries. The reduction of the tool change time as well as rapid travel time can enhance the productivity. However, the high speed feed drive system generates more heat in nature, which leads thermal expansion that has adverse effects on the accuracy of machined parts. The detail of the model proposed is described in the paper together with the experimental methodologies using a proposed compact measurement system to examine the validity of the proposed approach. The results showed the machining accuracy could be maintained to better than $\pm 5\mu\text{m}$ while using this T-18 sensor

Key Words : Machine tool(공작기계), Productivity(생산성), Thermal expansion(열팽창), Machining accuracy(가공 정밀도)

1. 서론

고정밀 가공은 기계 제조 관련 산업의 중추적인 기반을 담당하고 있는 분야로써 기계 부품들이 고성능화, 경량화, 소형화 될 뿐만 아니라 부품 소재도 점차 다양화되고 있어 부품의 고품질화를 통해 기술 경쟁력을 확보하기 위한 수단으로 고정밀 가공에 대한 중요성이 증대되고 있다. 이러한 고정밀 가공을 실현하기 위해서는 고정도의 공작기계 제작 및 고정도로 가공할 수 있는 능력을 가지는 기계의 생산을 끊임없이 요구하고 있다.

공작기계는 각축의 운동에 의하여 발생하는 오차 요인을 가지고 있으며 각축간의 기하학적 및 기구학적 관계 때문에 필연적으로 가공 오차를 가지게 된다. 공작기계를 이용한 기계가공시 발생하는 가공 오차는 공작 기계 제작시 가지고 있던 기하학적 오차와 절삭가공시 발생하는 절삭력 및 공작물의

하중에 의한 탄성 변형, 주위의 환경 변화 및 기계 작동에 의해 작동하는 열응력 등에 의하여 발생된다. 특히 기계 작동에 의하여 공작 기계의 스피들 부분과 구동 모터가 부착된 베드부분에서 발생하는 열에 의한 공작기계 구조물의 변형량은 공작기계 발생하는 전체 가공 오차량의 70%정도를 점유하는 것으로 보고되어지고 있다. 실제 절삭 가공에서는 여러 가지 오차 원인에 의해서 가공 정밀도가 영향을 받게 되고, 정밀 가공에서는 가공오차가 중요하며 가공 중 발생하는 오차를 측정 장치를 이용하여 측정된 후 가공 조건을 조절하여 공작물 자체의 오차 개선을 추구하는 제어의 방법이 요구된다. 가공 정도를 저하시키는 주요한 원인으로 작용하는 것은 공작기계의 이송 부분과 기계 구조물의 형상 부분에서 발생하는 기하학적 오차와 이들의 기하학적 오차가 공작기계의 발열이나 주위의 온도 변화에 따라서 야기되는 열변형 오차이다. 공작기계의 열변형과 보상법에 대하여 Junji등은

선반과 MC에 대한 발열 특성과 온도 제어 방식에 대하여 연구하였고,^[1] Toshio등은 가공 개시전 초기 안정화에 대하여 연구하였고,^[2] Yoshimi등은 변형 열원에 대한 제어에 대하여 연구하였고,^[3] 불나사 열변형에 따른 보정에 대해 연구하였고,^[4] 그밖에 공작기계의 열변형에 관한 연구 논문^[5-9] 등이 다수 보인다.

본 연구에서는 공작기계의 기하학적 오차와 온도 변화에 의하여 야기되는 공작기계의 가공 정밀도 개선을 다루고 있으며 측정용 센서(T-18)를 이용하여 공작기계의 위치 정도 오차를 측정 후 MACRO를 이용한 프로그램을 설계하여 공작기계의 가공 오차량을 최소화시켜 공작기계의 가공 정밀도 향상에 기여하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 불나사의 열원

불나사가 발열하는 원인은 주로 나사 축과 너트 사이에 있는 볼에 작용하는 마찰력에 크게 기인한다. 이를 수치화 시키기 위하여 입력되는 토크 중 이 부분에서 손실되는 토크를 계산하여 마찰력을 계산하는 방법이 있다. 구체적으로 설명하면, 전체 토크는 크게 다음의 세 가지 손실의 합과 크기가 같게 된다. 첫째로 나사 축과 너트 사이의 접촉 지역에서의 토크 손실, 둘째로, 너트의 가이드와 너트 가이드 안내면에서의 토크 손실, 셋째로, 베어링과 모터 부에서의 토크 손실이 그것이다. 이 중에서 실제로 불나사의 열원으로 제일 크게 기여하는 부분은 첫째로 말한 나사 축과 너트 사이의 접촉 지역에서의 토크 손실이다. 이를 수치화 시키면 식(1)과 같다.

$$T_i = \int_0^l \mu W r \omega dx \quad (1)$$

여기에서 γ 은 나사 축의 반경이고, ω 는 나사의 회전 각속도이고, W 는 예압중에서 이 부분에 기여하는 하중이고, μ 는 마찰계수이다. 이 중 γ 과 ω 는 쉽게 얻을 수 있는 값이지만, W 와 μ 는 쉽게 얻기가 힘들다. 그래서 W 를 얻기 위해서는 적절한 Static 모델링이 필요하고 μ 는 실험치를 이용하거나 문헌의 값을 참고할 필요가 있다.

2.2 열변위

일반적으로 공작기계는 운전개시에서 정상 상태까지 도달하는 동안 열변형에 따라 정도 변화가 있고 이것이 실용상 가공정도에 영향을 주는 경우가 많으며, 그 중에서도 열변형에 의한 정도변화에 가장 민감한 불나사는 운전중 너트와 축의 접촉에 의하여 발생하는 열에 의하여 온도가 상승하며 이로 인하여 불나사가 신장되어 공작기계가 요구하는 정도를 낼 수 없게 된다. 불 나사는 축 이송계에 적용되는 불나사는 축 방향의 위치결정 정도가 공작기계의 이송에 따른 정도를 좌우하기 때문에 반경 방향의 열팽창은 무시되고 축 방향의 열팽창량만 고려된다. 불나사 열변위 ΔL 은 식(2)과 같다.

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

여기서 β 는 나사축 재료의 선 팽창계수, $\Delta \theta$ 는 나사 축의 온도 상승 치이고, L 은 나사 축 길이이다. 따라서 불 나사의 온도상승을 최대한 억제하여 정도를 안정시키는 것이 공작기

계 정도 유지에 매우 중요한 과제이다. 발열을 억제하는 방법으로는 볼 나사의 외압을 적량화 하는 방안, 올바른 윤활유의 선정과 공급, 볼나사의 리이드를 크게 하여 회전수를 낮추는 방안, 볼나사의 설치정도를 높여 너트와 나사 사이에 레이디얼 하중이 작용되지 않도록 해야한다.

또한 공작기계의 열변위를 최소화하는 방안으로 유온의 온도를 관리할 수 있도록 오일콘 설치, 공작기계 내부의 온도가 상승된 공기를 강제 방출 시킬 수 있는 냉각팬 설치도 필요하다.

3. 실험장치

3.1 실험 장치

본 실험장치는 Fig.1과 같이 CNC선반을 사용하였고, T-18 Sensor는 조립 및 설치 오차를 최소화하기 위해 주축대에 고정하였다.



Fig.1 Experimental set-up for the measurement

본 실험장치에 적용한 T-18 Sensor에 대한

사양은 Table 1과 같다.

TYPE	SPECIFICATION
MAKER	MARPOSS
Probe axes with straight stylus	$\pm X, \pm Y$
Unidirectional repeatability (2σ) at speed up to 600mm/min	1 μ m
Trigger force on X, Y plane	55g
Overtravel on X, Y plane	5, 5 mm
Watertightness	IP67

Table 1. Specification of the T-18 Sensor

3.2 보정방법

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, 특히 변수, 연산지령, 제어지령을 응용해 사용자가 필요로 하는 기능등을 나타낼 수 있다.^[10]

본 실험장치를 위한 열변위 Program setting 용 Tool Lay out는 Table.2와 같다.

먼저 원점 복귀 위치(Reference position)에서 센서의 각 축방향에 해당하는 접촉면까지의 거리를 각각 축에 설정하고, 또한 센서에 급이송속도로 접촉을 할 경우 센서의 파손이나 측정 오차량의 발생하므로 일반적으로 접촉이전의 일정한 구간에서 피드 이송이 되도록 피드 이송 시작 지점에서 센서 종점까지 X, Z축상에 증분값을 Macro VAR.에 입력하고 가공작업을 실시한다. 2시간 이상 연속 가공후 본 실험 장치에

전용으로 적용하기 위해 공구대에 부착된 MASTER TOOL을 이용하여 T-18 Sensor에 접촉시켜 원점 복귀 위치(Reference position)에서 센서까지의 증분값을 얻을 수 있다. 이때 연속 가공 전의 증분값과 2시간 연속 가공후의 증분값을 비교하여 변위량을 NC에 입력되어 공작 기계가 완전히 냉각후 연속 가공 시작할 경우 가공 전후의 비교값을 Feed 이송량에 보정을 실시 하므로써 공작기계의 열변위에 의한 가공 오차량을 최소화 할 수 있다.

NO	MACRO VAR	DATA SETTING ADDRESS
1	#500	Z축 기계좌표
2	#501	X축 기계좌표
3	#502	시작점에서 종점까지의 Z축 상의 증분치
4	#503	시작점에서 종점까지의 X축 상의 증분치
5	#504	Sensor 한 변의 길이
6	#514	한시간 이상 연속가공후 MASTER TOOL의 X축 좌표치
7	#515	한시간 이상 연속가공후 MASTER TOOL의 Z축 좌표치
8	#531	Feed 이송 속도

Table 2. Macro VAR. relative to data setting address

4. 실험 결과 및 고찰

축방향(Z축) 및 수직방향(X축)의 열변위에 대하여 실험 결과 오차량을 Fig.2, 3, 4와 같은 결과를 얻었다.

열변위에 대하여 본 연구에서 제시한 프로그램을 적용전, 후의 X축 가공 DATA를 Fig.2에서 나타내고, Z축 방향의 가공 DATA를 Fig.3에, Fig.4는 CAM SHAFT 자동화 가공 라인에 실제로 본 연구에서 제시한 프로그램을 적용한 결과로 수직방향(X축)에 해당하는 가공경과 축

방향(Z축)에 해당하는 가공 폭의 가공정밀도를 나타내고 있다.

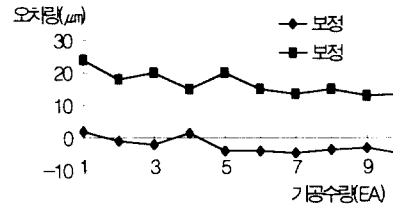


Fig.2 열변위 보정 적용전후 X축 가공 DAT

Fig.2는 열변위 보정전,후 수직방향(X축)의 가공 DATA로써 적용전,후의 상태를 살펴보면 가로방향이 가공수량을 나타내고, 수직방향은 오차량을 나타내고 있다. 두 경우 가공 반복정밀도는 적용 전에는 10 μ m,적용 후에는 5 μ m으로 가공 반복정밀도는 차이가 없으나 적용전의 경우 12시간 동안 기계를 OFF 시킨 후 다시 작업을 시작한 경우 OFF전 가공정밀도와 12시간 후 가공을 실시하여 가공정밀도를 비교한 결과 가공경의 오차량은 25 μ m임을 나타내고 있다. 이와 같은 오차량을 기초로 설계된 보정 프로그램을 적용한 후 동일한 방법으로 가공을 실시한 시험결과 \pm 5 μ m으로 관리 할 수 있는 것을 알 수 있었다.

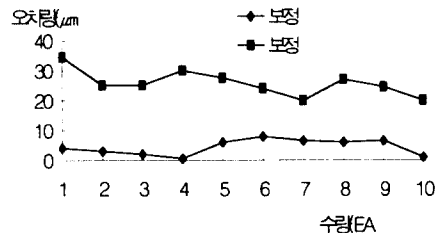


Fig.3 열변위 보정전후 Z축 가공 DAT

Fig.3은 축방향(Z축)의 가공 폭의 DATA로 X축과 동일한 방법으로 시험한 결과 보정 전에는 35 μ m, 보정후 9 μ m의 가공 오차량을 얻을 수 있

35 μm , 보정후 9 μm 의 가공 오차량을 얻을 수 있었다. 보정 프로그램을 적용전 오차량의 주요한 원인으로써 불나사의 열변위와 본 실험에 적용한 CNC선반의 주축대의 벨트 장력과 베어링의 예압등의 원인으로 회전 에 따른 주축대의 정도 변화와 유압에 의해 작동되는 ATC(Auto Tool Change)의 유온 상승에 따른 ATC FRAME의 열팽창에 따라 발생하는 오차량으로 생각된다.

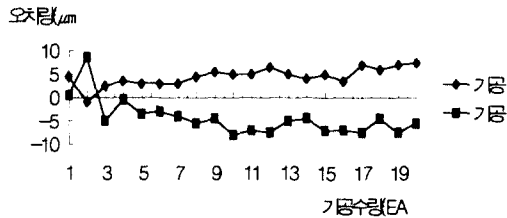


Fig.4 Cam shaft work Dat

Fig.4는 CAM SHAFT 자동화 가공 라인에 실제로 본 연구에서 제시한 프로그램을 적용한 결과로 수직방향(X축)에 해당하는 가공경과 축 방향(Z축)에 해당하는 가공 폭의 가공정밀도를 $\pm 5\mu\text{m}$ 으로 관리 될 수 있음을 나타내고 있다.

5. 결론

축방향(Z축) 및 수직방향(X축) 열변위에 의한 가공 오차량의 변화를 T-18 Sensor를 이용하여 실시간 열변위 제어 방법을 도출한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Macro를 이용하여 적용 프로그램을 설계하여 T-18 Sensor와 설계된 프로그램으로 열변위에 따른 오차량을 제거 할 수 있음을 알 수 있었다.
2. 자동화 라인에서 가공 시작 전 아이들 시간을 배제 할 수 있는 하나의 방법을 제시 하였다.

3. 본 연구에서 설계된 프로그램으로 실제 자동화 라인에 적용한 결과 기계작동 시작후 2 시간 동안 $\pm 5\mu\text{m}$ 으로 유지 할 수 있었다.

REFERENCES

- [1] Junji Chigira, Yoshiaki Kakino, Study on Temperature Control of Machine Tools(4th Report) - Selection of Temperature Control Methods Suitable for Lathes and Machining Centers with Different Thermal Characteristics -, JSPE, Vol. 53, No. 4, pp.113-120, 1987. 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] Yoshimi Takeuchi, Nobuyuki Okubo, Toshio Sata, Control of the Thermal Deformation of a Machine Tool(2nd Report), - Control on Varying Heat source - JSPE, Vol. 41, No. 11, pp.50 - 54, 1975. 11
- [4] Sungoh Hong, Gyujae Cho, Basic Science and Engineering, Chosun University, Vol. 1., No 1, 369-373, 1997.
- [5] 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
- [6] 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
- [7] 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.

- [8] 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.
- [9] Yamaguchi, Influence of Ball screws and Slide ways on Positioning Accuracy, NSK Technical Journal, No. 650, 1989
- [10] "FANUC series O-Mate for Lathe Operator's Manual" FANUC LTD. pp.240 - 294 1988.