

## 접촉 센서를 이용한 CNC 선반 열변형에 따른 위치오차 개선에 관한 연구

홍성오\*

(논문접수일 2002. 5. 21, 심사완료일 2002. 7. 16)

### A Study on Improvement Position Error induced Thermal Deformation of CNC Lathe Using Touch Sensor

Sung-oh Hong\*

#### 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 sensor.

**Key Words :** Machine Tool(공작기계), Productivity(생산성), Thermal Expansion(열팽창), Machining Accuracy(가공 정밀도)

### 1. 서론

생산 가공기술의 향상과 더불어 공작기계의 수요가 확대되고 있으며, 오늘날 공작 기계는 가장 기본적인 생산 설비로서 일반화되고, 자동화대응, 가공 정도의 향상, 납기 단축, 원가절감 등 다양한 목적으로 적용되고 있다. 이러한 공작기계에 요구되어 왔던 기능 및 성능은 고품질의 부품

을 고생산성으로 가공하는 것이다. 이 요구를 만족시키기 위한 수단으로서 공작기계의 고정밀화, 고신뢰화, 고속화, 그리고 자동화 등이 수행되어 왔다. 또한 공작기계의 정밀도를 저하시키는 최대 요인 중 하나가 열변형에 의한 오차이다. 공작기계를 이용한 기계가공 중에 발생하는 가공 오차는 제작시 가지고 있던 기하학적 오차와 절삭가공 중에 발생하는 절삭력 및 공작물의 하중에 의한 탄성 변형, 주위

\* 주저자, 화천기공(주) 기술개발연구소 (hso@hwacheon.co.kr)  
주소: 506-251 광주광역시 광산구 장덕동 976-1, Tel: 062-950-1665

의 환경 변화 및 기계 작동에 의한 열용력 등에 의하여 발생된다. 실제 절삭 가공에서는 여러 가지 오차 원인에 의해서 가공 정밀도가 영향을 받게 된다. 정밀 가공에서는 가공 오차가 중요하며 가공 중 발생하는 오차를 측정 장치를 이용하여 측정된 후 가공 조건을 조절하여 공작물 자체의 오차 개선을 추구하는 기하학적 적응 제어의 방법이 요구된다. 가공 정도를 저하시키는 주요한 원인으로 작용하는 것은 공작기계의 이송 부분과 기계 구조물의 형상 부문에서 발생하는 기하학적 오차와 이들의 기하학적 오차가 공작기계의 발열이나 주위의 온도 변화에 따라서 야기되는 열변형 오차는 전체 절삭 공정에서 야기되는 가공 오차량의 70%를 차지한다.

공작기계의 열변형과 보상법에 대하여 Junji<sup>(1)</sup>는 선반과 MC에 대한 발열 특성과 온도 제어 방식에 대하여 연구하였고, Toshio<sup>(2)</sup>는 가공 개시전 초기 안정화에 대하여 연구하였고, Yoshimi<sup>(3)</sup>는 변형 열원에 대한 제어에 대하여 연구하였고, 그밖에 공작기계의 열변형에 관한 연구 논문<sup>(4-9)</sup> 등이 다수 보인다.

자동화 라인은 특성상 동일한 제품을 반복해서 가공하게 된다. 여기서 일정한 시간동안 자동화 라인을 정지 후 다시 작업을 시작할 경우 공작기계의 온도 변화에 의하여 가공정밀도는 급속히 저하되어 불량품을 생산하게 된다. 따라서 본 연구에서는 온도 변화에 의한 가공정밀도 저하를 개선하기 위하여, 측정용 센서(T-18)를 이용하여 공작기계의 위치 정도 오차를 측정된 후, 매크로(MACRO)를 이용한 프로그램을 설계하여 불량률을 저하시키고, 가공준비시간을 감소시킴으로써 가공 정밀도 향상시킬 수 있는 방법을 제시하고자한다.

## 2. 공작기계의 열변형 거동

공작기계에 공급된 전기에너지는 절삭에너지로만 소비되지 않고 주축이나 모터의 열에너지로도 소비된다. 그 결과 공작기계에 전원을 투입하면 공작기계를 가열시켜 열변형을 발생하게 된다. 여기서 공작기계의 내부에서 소비된 열 에너지를 Qin(kcal/h), 공작기계 전체의 열용량을 Cw(kcal/°C), 또한 공작기계에서 배출된 열량을 Qloss(kcal/h)이라 하면, 공작기계 전체의 평균온도 상승량 Tm(°C)의 시간 t에 대한 변화는 (1)식과 같이 구하여 진다.

$$C_w(dT_m/dt) = Qin - Qloss \quad (1)$$

또한 공작기계에서 배출열량 Qloss는 공작기계 표면의 국소면 (ds)에 대한 온도상승량 Ts와 열전달율 ( $\alpha_s$ )의 적분치  $\int_s T_s \alpha_s ds$ 로 구할 수 있지만 간단히 (2)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{loss} = \alpha_m T_m S_o \quad (2)$$

여기서  $S_o$ 는 공작기계의 전표면적( $m^2$ )이 되고,  $\alpha_m$ 은  $\int_s T_s \alpha_s ds / T_m S_o$ 에 의해 구하는 평균열전달율(kcal/ $m^2 h^\circ C$ )이 된다. 따라서 공작기계 평균 온도 상승량  $T_m$ 의 시간적 거동은 (1)식과 (2)식에서 (3)식과 같이 쓸 수 있다.

$$C_w(dT_m/dt) + \alpha T_m S_o = Qin \quad (3)$$

(3)식의 각 항에  $C_w$ 을 곱하면 (4)식과 같이 된다.

$$\frac{dT_m}{dt} + \frac{\alpha S_o}{C_w} T_m = \frac{Qin}{C_w} \quad (4)$$

위 식을 선형 1차 미분방정식을 적용하면

$$T_m = e^{-\frac{\alpha_m S_o}{C_w} t} \int \frac{Qin}{C_w} e^{\frac{\alpha_m S_o}{C_w} t} dt + C e^{-\frac{\alpha_m S_o}{C_w} t} \quad (5)$$

이 된다.

이것을 다시 정리하면

$$T_m = \frac{Qin}{\alpha_m S_o} - \frac{Qin}{\alpha_m S_o} e^{-\frac{\alpha_m S_o}{C_w} t} = \frac{Qin}{\alpha_m S_o} (1 - e^{-\frac{t}{t_0}}) \quad (6)$$

이 된다. 단  $t_0 = \frac{C_w}{\alpha_m S_o}$  이다.

## 3. 실험장치 및 보정방법

본 실험장치는 Fig.1과 같이 CNC선반(회천기계, HI-ECO21HS)을 사용하였고, Sensor(T-18, MARPOSS)는 조립 및 설치 오차를 최소화하기 위해 주축대에 직접 고정하였다. 본 실험장치에 적용한 T-18 Sensor에 대한 사양은 Table 1

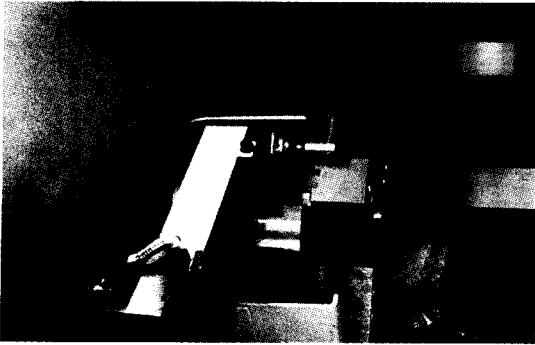


Fig. 1 Experimental set-up for the measurement

Table 1. Specification of the T-18 Sensor

TYPE	SPECIFICATION
MAKER	MARPOSS
Probe axes with straight stylus	$\pm X, \pm Y$
Unidirectional repeatability( $2\sigma$ ) at speed up to 600mm/min	1 $\mu$ m
Trigger force on X, Y plane	155g
Overtravel on X, Y plane	5, 5mm
Watertighness	IP67

과 같다.

다양한 보정 기능 중 Custom Macro는 사용자가 독자적인 프로그램을 작성하여 (자동 Cycle, Patten 기능등) 메모리(Memory)에 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>(10)</sup>.

본 연구에서 적용한 CNC선반의 가공 공정은 가공물의 직경과 길이를 관여하기 때문에 X, Z축의 변화량이 가공 정도에 직접적인 영향을 준다. 일반적으로 CNC선반의 경우 실 가공과 별도로 이송체를 연속 운전할 경우 이송계에서 열변위가 안정되는 시간을 30분으로 보고되고 있다<sup>(11)</sup>.

하지만 본 연구의 경우 실 가공을 수행 할 경우 현장에서 반복 테스트 결과 열변위에 의한 가공 오차가 안정되는 시간을 60분으로 설정할 수 있었다.

연속가공 전의 X, Z축의 증분값을 확인하기 위해 X, Z축 기계좌표와 시작점에서 종점까지 X, Z축상에 증분값을 매크로 변수(Macro VAR.)에 입력하였다. 그리고 열변위에

Table 2. Macro VAR. relative to data setting address

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

의한 가공 오차가 안정되는 시간인 60분 후 공구대에 장착된 기준공구를 이송 프로그램으로 공구대를 이송시켜, 본 연구를 위해 주축대에 장착된 T-18 Sensor에 접촉시킴으로써 시작점에서 종점까지 X, Z축상에 증분값을 확인하였다. 확인된 증분값과 연속가공 전의 증분값을 비교하여 변위량을 매크로 변수에 입력하였다. 이와같이 매크로 변수에 변위량을 입력하게 되면 실 가공 프로그램을 수행 할 경우 공구대의 이송량을 변위량에 따라 변화시키게 된다. 또한 본 연구에서 제시한 열변위 프로그램의 매크로 변수들은 Table 2와 같이 나타내었다.

#### 4. 실험 결과 및 고찰

먼저 Skip 위치의 변화량과 인디케이터 눈금의 변화량을 비교하여 센서의 반복정도가 가공정도에 미칠 수 있는 영향을 파악하기 위하여 열변위 확인 프로그램을 자동 연속운전 하면서 Skip 위치에서의 절대 좌표치와 인디케이터의 변화량을 관찰하여 자동과 수동의 OFFSET의 조정없이 데이터를 작성 Fig. 2, 3과 같이 나타냈다. Fig. 2는 X축 방향(가공물 직경), Fig. 3은 Z축 방향(가공물 길이)에 대해 Skip의 위치변화량과 인디게이터 변화량을 30회 반복 측정한 결과를 나타내고 있다. Fig. 4, 5는 열변위 프로그램을 적용하여 자동연속운전을 하면서 Skip 위치의 변화량을 관찰하므로써 NC가 인식하는 열변위량을 확인하기 위해 10시간 이상 장비를 정지시킨 후 열변위 확인 프로그램을 가동하여 Skip 위치에서 절대좌표의 변화량을 관찰하여 자동, 수동 OFFSET 조정없이 데이터를 작성하여 나타냈다. Fig. 4는 X축 방향

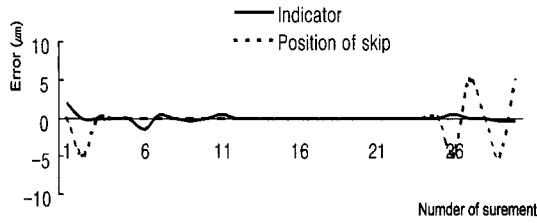


Fig. 2 The measured repeatability relative rate to number of measurement for x-axis sensor

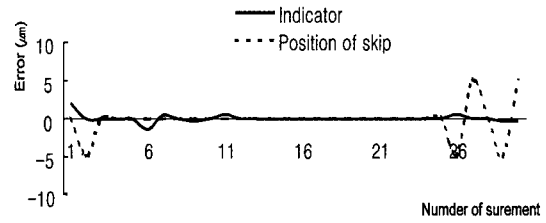


Fig. 3 The measured repeatability relative rate to number of measurement for z-axis sensor

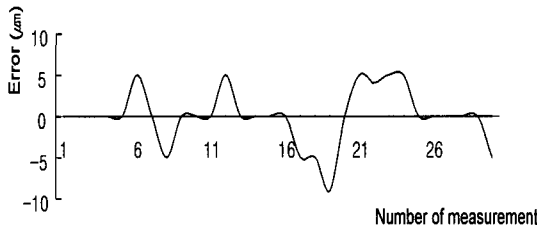


Fig. 4 The measured thermal displacement relative rate to number of measurement for x-axis sensor

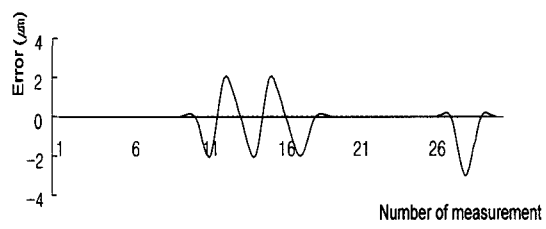


Fig. 5 The measured thermal displacement relative rate to number of measurement for z-axis sensor

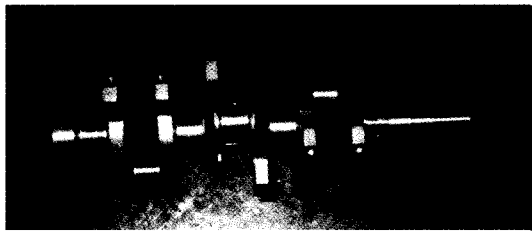


Fig. 6 Crankshaft

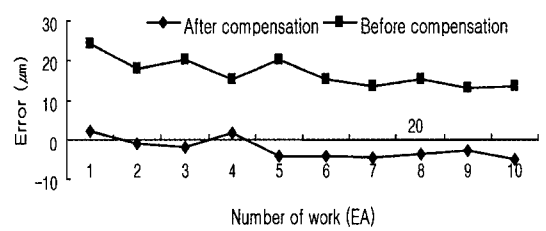


Fig. 7 The measured compensation of thermal displacement relative to work

과 Fig. 5는 Z축 방향에 대해 Skip의 위치변화량을 30회 반복 측정된 결과를 나타내고 있다.

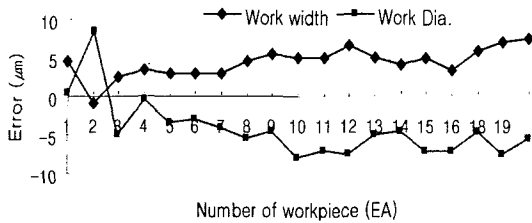
축방향(Z축) 및 수직방향(X축)의 열변위에 대하여 오차량을 본 연구에서 제시한 결과 Fig. 6과 같은 가공물의 형상과 Fig. 7, 8결과를 얻었다.

열변위에 대하여 본 연구에서 제시한 프로그램을 적용 전, 후의 X축 가공 데이터를 Fig. 7에서 나타내고, Fig. 8은 크랭크샤프트 자동화 가공 라인에 실제로 본 연구에서 제시한 프로그램을 적용한 결과로 수직방향(X축)에 해당하는 가공경과 축방향(Z축)에 해당하는 가공 폭의 가공정밀도를 나타내고 있다.

Fig. 7은 열변위 보정전, 후 수직방향(X축)의 가공 정 데이터로써 가로방향이 가공수량을 나타내고, 수직방향은 오

차량을 나타내고 있다. 적용전, 후의 상황을 살펴보면 두 경우 가공 반복정밀도는 적용 전에는 10 $\mu$ m, 적용 후에는 5 $\mu$ m으로 가공 반복정밀도는 차이가 없으나 적용전의 경우 12시간 동안 기계를 OFF 시킨 후 작업을 시작한 경우 OFF전 가공경과, ON 시킨 후 가공경의 오차량은 25 $\mu$ m으로 동일한 방법으로 보정 프로그램을 적용한 후 가공 시험결과 5 $\mu$ m으로 관리할 수 있었다.

Fig. 8은 축방향(Z축)의 가공 폭의 데이터로 X축과 동일한 방법으로 시험한 결과 보정 전에는 35 $\mu$ m, 보정후 9 $\mu$ m의 가공 오차량을 얻을 수 있었다. 이러한 원인으로는 볼나사의 열변위와 주축대 회전 때 따른 주축 센터의 변화, 자동공구교환 장치의 유온 상승에 따른 프레임의 열팽창으로 생각된다.



**Fig. 8 The measured compensation of thermal displacement relative to crankshaft**

Fig. 8은 크랭크샤프트의 자동화 가공 라인에 실제로 본 연구에서 제시한 프로그램을 적용한 결과로 수직방향(X축)에 해당하는 가공경과 축방향(Z축)에 해당하는 가공 폭의 가공 정밀도를  $\pm 5\mu\text{m}$ 으로 유지 할 수 있었다.

### 5. 결론

축방향(Z축) 및 수직방향(X축)의 열변위에 대하여 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 제거할 수 있음을 알 수 있었다.
- (2) 자동화 라인에서 가공 시작 전 아이들 시간을 배제 할 수 있는 하나의 방법을 제시하였다.
- (3) 본 연구에서 설계된 보정 프로그램으로 자동화 라인에 적용한 결과 열변위에 의한 오차량이 안정되는 시간은 60분 정도이고 기계 작동 시작 후 2시간 동안  $\pm 5\mu\text{m}$ 으로 유지 할 수 있었다.

### 참고 문헌

(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.

(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) 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.

(4) Keiji Okushima, Yoshiaki Kakino, Thermal Deformation of Machine Tools(3rd Report) - Effects of the Circulation of Fluids -, JSPE, Vol. 39, No. 2, pp. 230 ~ 236, 1973.

(5) 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.

(6) 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.

(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.

(11) 홍성오, 조규재, 김재열. "CNC 선반에서 불나사 열변형에 따른 위치결정 정도 개선에 관한 연구", 『한국공작기계학회지』, 8: pp. 45 ~ 51, 1999.