

## 공작기계 열변위 보정에 관한 연구

이인재\*, 최영휴\*\*, 정원지\*\*

### A Study on the Compensation of the Thermal Errors for Machine Tool

In-Jae Lee\*, Young-Hyu Choi\*\*, Won-Jee Chung\*\*

#### Abstract

This paper presents an indirect compensation of thermal errors during machining, in which thermal error is modelled as a linear regression of temperatures measured at 4 specified positions. In this regression model, weighting coefficients of the measured temperatures were estimated by using the least square method. The grinding test with compensation, after 4-hour warming-up operation before the test, showed that the maximum machining error of the work pieces was reduced to  $12\mu\text{m}$  while it measured by  $28\mu\text{m}$  without compensation. Furthermore the standard deviation of machining errors was also reduced from  $8\mu\text{m}$  to  $2\mu\text{m}$ .

**Key Words :** Thermal error(열변위)

### 1. 서론

공작기계에서 가공정밀도와 가공능률의 한계를 지배하는 인자는 크게 정적 및 동적 요인과 열적 요인이 있다. 특히 열적 요인의 경우 실제 복잡한 구조의 공작기계에서는 여러 종류의 인자가 서로 간섭하게 되므로 사전에 가공 정밀도를 정확하게 예측하거나 열변위를 보정하기가 쉽지 않다. 이 때문에 1960년대 초반부터 열변위 보정에 대한 학문적인 연구가 시작된 이래 선진국에서는 초정밀 가공을 실현하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있

다.<sup>(1,2,3,4,5,6,7,8)</sup> 주요 연구동향을 정리하면; 1) 열발생 감소와 열원의 단열에 대한 연구, 2) 공작기계 및 공구의 냉각방법의 개선에 대한 연구, 3) 열변위 보정방법에 대한 연구로 대별할 수 있다.

열적인 요인으로 인하여 공작기계의 가공정도가 저하되는 과정은 Fig. 1과 같이 개괄할 수 있다. 먼저 기계가공 중에 내부적인 열원과 외부적인 열원으로 인하여 공작기계의 여러 부위에서 열이 발생된다. 대표적인 내부 열원으로는 공구나 공작물의 가공열과 전동기나 베어링의 마찰열인 손실열 등이 있고, 외부 열원으로는 작업장의 실온과

\* 기성테크 & 컨설팅 대표  
\*\* 창원대학교 기계설계공학과

냉난방 복사열 등이 있다. 이러한 열원이 원인이 되어 발생한 열이 공작기계에 전달되면서 열전달 특성에 따라 각 부위의 온도가 상승한다. 기계 각 부위의 온도 상승에 따라 열변위가 부품별로 일어나면서 기계의 기하학적 형상 및 구속 조건에 따라 기계 전체에 열변위의 차이가 발생하고 이에 따라 공구와 공작물 사이에 상대변위가 발생하며 이로 인하여 가공정도가 저하된다.

본 연구에서는 NC 앵글러(Angular) 연삭기의 열변위를 이론 및 실험적 방법으로 분석하고 가공정밀도 향상을 위한 열변위 보정 방법을 제시하고자 한다.

## 2. 공작기계 열변위 보정이론

본 연구에서는 열변위에 따른 기계가공의 정밀도 저하를 방지하기 위한 대책으로서 간접보정 방법으로서 복잡한 이론식을 배제하고 열변위를 온도의 단순 1차함수로 가정하고 열변위를 해석한 다음 보정하는 방법을 제시한다.

온도 변화량으로부터 기준되는 부위의 열변위량을 계산하는 과정을 보면, 서로 다른 몇 개 지점의 온도 변화를 사용하여 기준점의 열변위량을 추산한다. 이때 추산 결과의 정확도를 개선하기 위한 방법으로 회귀분석법을 사용하였다. 본 연구에 있어서는 독립변수로서는 4개의 온도값( $T_1, T_2, T_3, T_4$ )으로 하고 종속변수로서는 열변위로 인한 위치 오차값으로 하였으며 기준점을 열변위가 가장 클 것으로 예상되는 스톨대로부터 190mm의 위치오차값( $E$ )으로 취하였고 회귀 분석법에 의한 모델링으로서 온도와 열변위는 다음 식과 같이 1차함수의 관계를 갖는다고 가정하였다.

$$E = \beta_0 + \beta_1 T_1 + \beta_2 T_2 + \beta_3 T_3 + \beta_4 T_4 + \varepsilon \quad (1)$$

여기서,  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ 는 온도-보정량 상관계수이며,  $\varepsilon$ 은  $E$ 를 측정할 때 발생하는 오차로서 정규분포를 따르고 오차 항간에는 상호 독립이라고 가정한다.

식(1)에서 미지의 계수값( $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ )의 추정은 최소제곱법(Least Square Method)에 의해 구해진다. 이 방법은 식(1)에서 추정오차  $\varepsilon$ 의 제곱의 합,  $S$ 를 최소로 하는  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ 를 구하는 방법이다. 먼저 추정오차  $\varepsilon$ 의 제곱의 합  $S$ 는 다음 식(2)와 같이 표현할 수 있다

$$S = \sum e^2 = \sum (E - \beta_0 - \beta_1 T_1 - \beta_2 T_2 - \beta_3 T_3 - \beta_4 T_4)^2 \quad (2)$$

다음,  $S$ 를  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ 에 대해서 각각 편미분하여 다음 관계식을 얻는다.

$$\partial S / \partial \beta_i = 0, \text{ for } i = 0, 1, 2, 3, 4 \quad (3)$$

식(3)에서 얻어진 5개의 연립방정식으로부터  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ 의 값을 구하여 (1)식에 대입하면 열변위 오차와 온도와의 관계식이 구해진다. 그러므로 기준위치에서의 열변위 오차의 보정량을 결정할 수 있다.

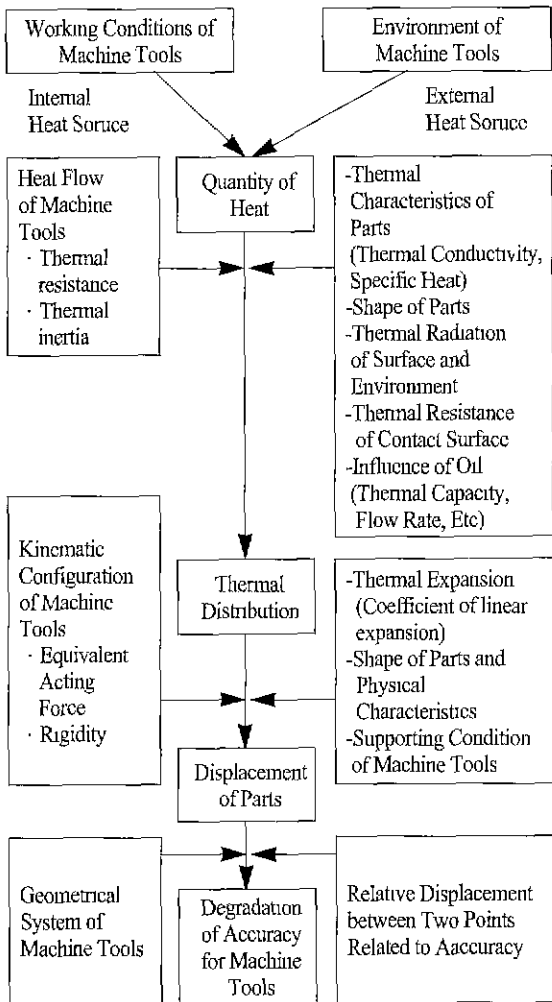


Fig. 1 Thermal Error Behavior of Machine Tools

### 3. 열변위 측정

#### 3.1 측정장치 및 대상 공작기계

측정장치의 전체적인 구성은 Fig. 2와 같이 PC를 중심으로 한 온도 측정장치와 위치 오차 측정장치로 구성된다. 일반적인 실험의 경우와 같이 대상 공작기계의 4곳에 온도 측정용 센서를 설치하였고 수집된 온도는 데이터 수집보드(Data Acquisition Board) 거쳐 PC에 입력되도록 하였다. 레이저 간섭계(Laser Interferometer)로 측정된 위치 오차도 GPIB를 거쳐 동시에 PC에 입력되도록 하였다.<sup>[9]</sup>

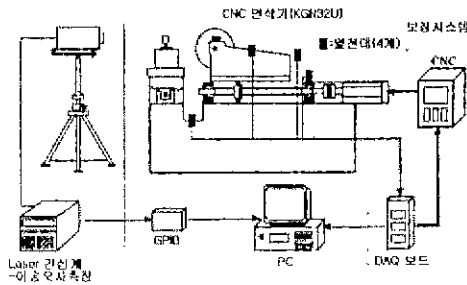


Fig. 2 Thermal Error Measuring System

온도 측정 및 열변위보정 실험용 공작기계는 앵글러형 원통연삭기이며 온도 측정 센서는 측정 온도 범위가 약 0℃ - 80℃, 분해능은 0.5℃정도이고 가격이 저렴한 K형 열전대 (Alum-Chromic 합금)를 사용하였다.

#### 3.2 측정 방법

측정 방법으로서 Fig. 3과 같이 온도는 NC연삭기의 3점 즉 베드(Bed), 스톨대(Wheel head), 볼스크류(Ball screw)에 온도센서를 설치하여 측정하였으며, 별도로 대기 온도 1점 등 총 4점을 측정하였다. 위치 오차의 측정은 NC Program에 의해 기계를 이동시키고 그 지령치와 측정기로 측정된 실제 이동량과의 차를 온도와 동일시간의 위치 오차로 기록하였다.

기계의 이동은 NC지령에 의해 서보모터, 볼스크류, 스톨대를 통해서 이동하였다. 제어 방식은 반폐쇄회로(Semi-Closed Loop)를 채택하였다.

#### 3.3 측정 시간

측정 시간은 아침 9시부터 오후 5시까지 8시간으로 하

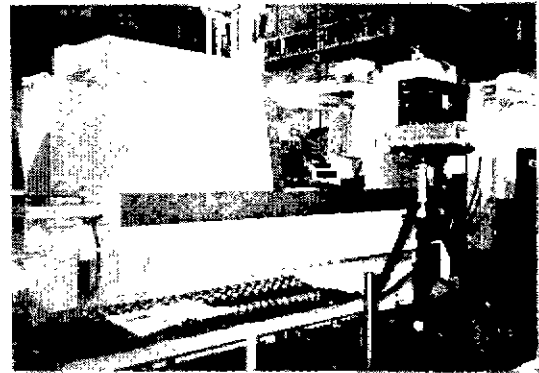


Fig. 3 Test Setup for Position Errors & Temperature Measurement

였다. 측정 위치는 스톨대를 원점에서 10mm → 100mm → 190mm까지 연속적으로 이동시키면서 온도와 열변위 값을 매 10분 간격으로 반복하여 측정하고 기록하였다. 총 측정시간은 5일간에 걸쳐 32시간이었다. Fig. 3은 가공중의 위치오차와 온도 측정 장면의 사진이다.

아래 Table 1에 온도와 위치오차 측정 데이터의 예(例)를 나타내었다.

Table 1 A Sample of the Measured Data

Time (min)	E1 (μm)	E2 (μm)	E3 (μm)	B_EX (μm)	T1	T2	T3	T4
0.9	0	-2.2	-7.4	-7.4	18.4	27.7	23.7	15.6
10.9	3	1.	-3.4	-6.4	18.4	28.	24	15.6
21	3	0.9	-3.3	-6.3	18.1	28.7	24.3	15.3
31	1	0.5	-3.	-4.	18.1	28.7	24.9	15.3
41.	0	-1	-4.	-4.	18.1	28.7	24.9	15.

Notes: E1, E2, E3 are position errors at 10mm, 100mm, 190mm from wheel head respectively. B\_EX= E3-E1.

And T1, T2, T3, T4 are temperatures measured at the bed, wheel head, ball screw, and atmosphere respectively(°C)

### 4. 열변위 보정 실험

#### 4.1 열변위 보정량의 결정

온도와 위치오차와의 상관 관계식은 전술한 회귀분석법 모델로부터 결정되는데 컴퓨터 프로그래밍한 도구<sup>[10]</sup>를

REGRESSION OUT DATA	
CONSTANT( )	: -13.10
STD ERR OF Y EST	: 2.98
R SQUARED	: 0.88
NO. OF OBSERVATIONS	: 197.00
X COEFFICIENTS	-3.09 8.68 -8.74 1.67
STD ERR COEF	0.25 0.57 0.64 0.27

Fig. 4 The Results of Regression

사용하여 계산한 결과는 다음의 Fig. 4와 같다.

다음 Fig. 4에 보인 출력된 결과에서 CONSTANT는 E의 절편 값인  $\beta_0$ 를 표시한다. STD ERR OF Y EST는 Y의 추정 표준오차를 나타내고 R SQUARED는 변수들과의 관계 함수 유형이 얼마나 적합한지의 정도를 나타내는 통계적 개념의 기준 값을 나타낸 것이다. 이것은 0에서부터 1까지의 값으로 나타나며 1일 때가 가장 적합한 유형이다. 또한 측정 NO. OF OBSERVATIONS는 종속변수들의 총갯수를 나타내며 X COEFFICIENT는 독립변수 T의 계수로서 구하고자 하는 수치, STD ERR OF COEF는 독립변수의 계수에 대한 표준 오차를 나타낸다.

따라서 위치오차와 온도와의 관계식은 다음과 같이 된다.

$$E = -13.10 + (-3.09T_1) + 8.68T_2 + (-8.74T_3) + 1.67T_4 \quad (4)$$

위 식에서  $T_1$ 은 베드 온도이고,  $T_2$ 는 슷돌대 온도,  $T_3$ 는 볼스크류 온도이며  $T_4$ 는 대기온도이다. 그리므로 원점에서 X축 방향으로 190mm지점의 열변위 오차, E에는 슷돌대 온도,  $T_2$ 와 볼스크류온도,  $T_3$ 가 가장 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

#### 4.2 열변위 보정효과 검증실험

본 연구에서 제시한 4개 지점의 온도 측정데이터부터 기준위치의 열변위 오차 보정량을 결정하는 방법에 대한 타당성을 검증하기 위한 가공 실험을 실시하였다. 소재의 형상은 Fig. 5와 같으며 재질은 SCM435이다.

#### 4.3 실험 결과

기계 가동후 4시간 경과 이후에 열변위 보정을 한 경우

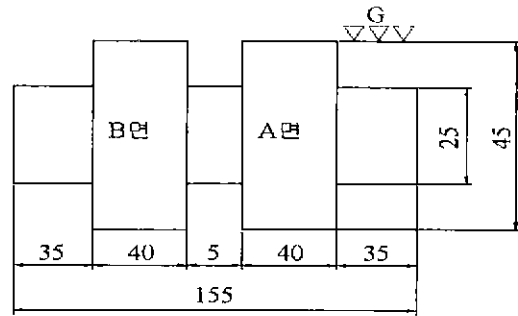
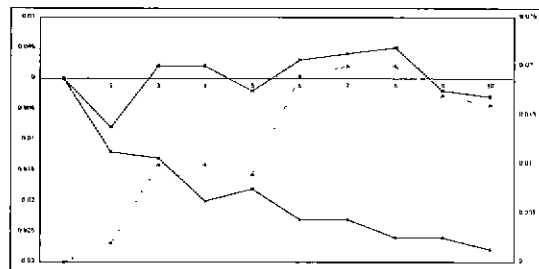


Fig. 5 Dimension of Work Piece



Notes:

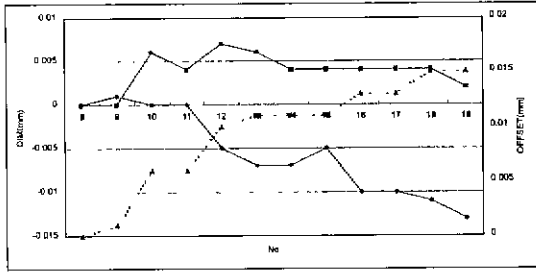
- : Change of machined length (compensation)
- ◆— : Change of machined length (non-compensation)
- ▲·· : Tool offset (compensation)

Fig. 6 Grinding Error Comparison between Compensation and Non-compensation (1st test, until 4 hours after machining starts)

와 하지 않고 가공작업한 시편의 치수오차 측정결과를 아래 그림에 각각 나타내었다. Fig. 6는 1차 실험의 가공 치수 결과이고 Fig. 7은 2차 실험, Fig. 8은 3차 실험의 가공 치수 결과이다. 그림에서 최초 가공물의 직경 치수를 0(Zero)으로 놓고 이후 가공 치수의 변화량을 도시하였다.

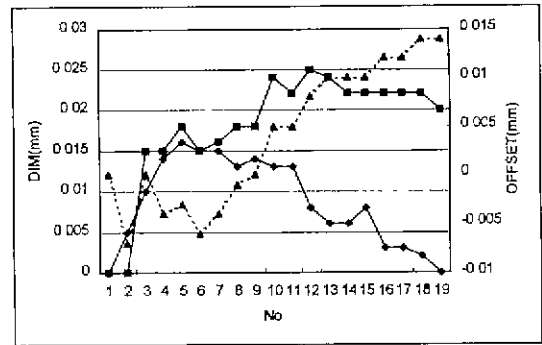
Fig. 9와 Fig. 10은 10시간 동안의 가공치수 변화량을 나타낸다. 왼쪽 세로축은 치수 변동량의 단위 수치이고 오른쪽 세로축은 Offset량의 단위 수치이며 하단부 가로축의 NO는 시편의 개수를 나타낸다.

이상의 결과를 이해하기 쉽게 표준편차(Standard deviation)만 정리하면 Table 2과 같다.



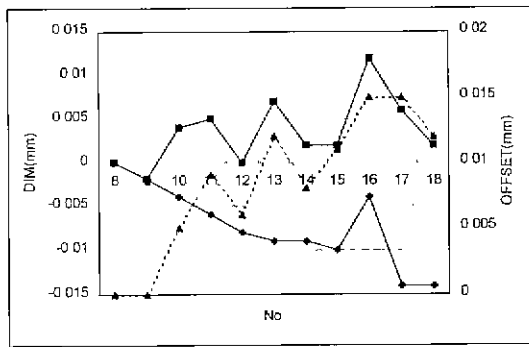
Notes:  
 —■— : Change of machined length (compensation)  
 —◆— : Change of machined length (non-compensation)  
 —▲— : Tool offset (compensation)

Fig. 7 Grinding Error Comparison between Compensation and Non-compensation (2nd test, until 4 hours after machining starts)



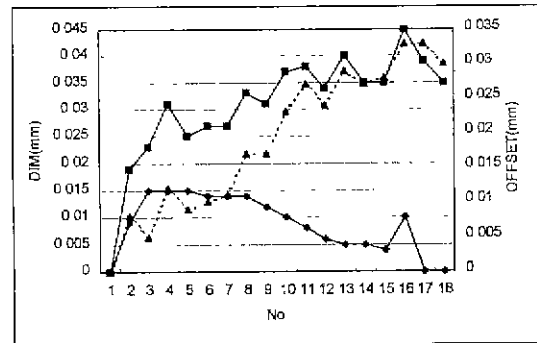
Notes:  
 —■— : Change of machined length (compensation)  
 —◆— : Change of machined length (non-compensation)  
 —▲— : Tool offset (compensation)

Fig. 9 Grinding Error Comparison between Compensation and Non-compensation (2nd test, until 10 hours after machining starts)



Notes:  
 —■— : Change of machined length (compensation)  
 —◆— : Change of machined length (non-compensation)  
 —▲— : Tool offset (compensation)

Fig. 8 Grinding Error Comparison between Compensation and Non-compensation (3rd test, until 4 hours after machining starts)



Notes:  
 —■— : Change of machined length (compensation)  
 —◆— : Change of machined length (non-compensation)  
 —▲— : Tool offset (compensation)

Fig. 10 Grinding Error Comparison between Compensation and Non-compensation (3rd test, until 10 hours after machining starts)

#### 4.4 결과 분석

본 연구의 목적이 열변위 보정에 의한 정도(精度) 향상 이므로 열변위보정과 정도 향상 여부를 분석하였다. Table 3는 기계가동 초기 4시간 동안의 가공오차 측정결과이고 Table 5는 기계가동 초기 4시간 동안의 측정 결과 이다. Table 3에 따르면 1차실험의 경우 비보정시 28 $\mu$ m 의 치수

변화가 8 $\mu$ m으로 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 특기할 사항은 Table 4에서 보는 바와 같이 초기 4시간 동안에는 보정이 불안정하여 오히려 치수변화가 심하였다.

Table 2 Results of Grinding Test

Measurement		Standard Deviation( $\mu\text{m}$ )			
		Until 4 hours after machining starts (every 30 minutes)		Until 10 hours after 4 hours of machining (every 30 minutes)	
Test	Number of Specimen	Compensation Surface (B)	Non-Compensation Surface (A)	Compensation Surface (B)	Non-Compensation Surface (A)
1st	10 EA	-	-	0.0037	0.0080
2nd	19 EA	0.0033	0.0051	0.0021	0.0047
3rd	18 EA	0.0056	0.0053	0.0038	0.0044

Table 3 The Accuracy of Grinding Test I

Test	Number of Specimen	Accuracy ( $\mu\text{m}$ ) after 4 hours of machining		Note
		Compensation	Non-Compensation	
1st	10 EA	8	28	Compensation Max:12 $\mu\text{m}$ Non-Compensation Max:28 $\mu\text{m}$
2nd	12 EA	7	13	
3rd	11 EA	12	14	

Table 4 The Accuracy of Grinding Test II

Test	Number of Specimen	Accuracy ( $\mu\text{m}$ ) after 4 hours of machining		Note
		Compensation	Non-Compensation	
1st	7 EA	18	18	Compensation Max:33 $\mu\text{m}$ Non-Compensation Max:14 $\mu\text{m}$
2nd	7 EA	33	14	

## 5. 결론

본 연구에서는 공작기계 가공 공정에서 온도와 열변위와의 상관 관계를 1차함수식으로 모델링하여 열변위 보정량을 결정하는 방법을 제안하였으며, CNC 연삭기를 대상

으로 열변위 보정 효과를 검증하기 위한 가공 실험을 수행하였다. 본 연구의 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 슷들대 부위의 온도( $T_2$ )와 볼스크류의 부위의 온도( $T_3$ )가 연삭기 구조물의 열변위 위치 오차에 상대적으로 큰 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다.
- (2) 열변위 보정 가공 실험 결과, 기계 가공 4시간 이후를 기준으로 비보정시는 최대 28 $\mu\text{m}$ 의 가공 오차 발생하였으나 보정시에는 12 $\mu\text{m}$  이내로 발생하였다.
- (3) 가공 오차의 표준편차량도 비보정 최대 8 $\mu\text{m}$ 인데 비하여 보정시는 2.1 $\mu\text{m}$ 으로 표준편차량이 1/4로 감소되었다. 따라서 제안된 방법이 가공 정도 향상에 매우 효과적임을 확인하였다.
- (4) 제안된 방법으로 열변위 보정을 한 경우에도 기존의 방법과 마찬가지로 가공 초기의 과도상태에서는 보정작용이 불안정하여 가공 정도 향상 효과가 미흡하였다.

## 참고 문헌

- (1) M. Weck, "Handbook of Machine Tools," Vol. 2, John Wiley & Sons, 1980.
- (2) 日本機械工業聯合會, "工作機械の熱變形に關する研究狀況," 生産技術の體系化に關する調査研究報告書, pp. 5~26, 1987.
- (3) 櫻庭 聖, "熱變形補正裝置," SEIKI Technical News, Vol. 86, pp. 56~59, 1989.
- (4) 垣野義昭, "工作機械の熱變形特性," 機械の研究, 第42卷, 第1號, pp. 141~151, 1990.
- (5) 고훈주, "CNC공작기계 이송오차의 발생 요인에 관한 실험적연구", 창원대학교 기계 공학과 석사학위논문, 1991.
- (6) 자동화신문사, "공작기계의 열변형 오차의 감소 및 보정방안", 생산자동화, 64권, 11월호, pp.107~119, 1995.
- (7) 김종관, 김상복, 이종기, 김화정, "공작기계 주축계 열적거동에 관한 연구", 한국공작기계학회지, 제8권, 1호, pp. 28~29, 1999.
- (8) 홍성호, 조규재, 김재열, "CNC선반에서 불 나시 열변형에 따른 위치결정 정도 개선에 관한 연구", 한국공작기계학회지, 제8권, 1호, pp. 45~46, 1999.
- (9) "5528A Laser Measurement System User's Guide", Hewlett Packard, 1985.
- (10) 김교인, "쿼트로프로 4.0," 정보문화사, 1992.