

## 공작기계의 열변형 예측을 위한 온도센서의 최적 위치 결정

Optimal Position of Temperature Sensors for the  
Prediction of Thermal Displacement in Machine Tools

이 찬홍\*

\* 한국기계연구원 공작기계그룹

Lee, Chan-Hong

KIMM, Machine Tools Lab.

### 1. 서론

최근의 기계 가공시스템은 가공기능이 고밀도로 압축되어, 작업자가 진행중인 가공상태를 단시간 내에 파악하기 어려울 정도로 복잡하다. 그러나 단위 기계별로 공정의 복합화와 자동화가 꾸준히 추진되어 가공기당 투입 작업인원을 감소시킴으로서 생산성을 증가시키고 있다. 이와 함께 작업자의 관리영역은 오히려 증가해서 여러 대의 기계를 동시에 관리하게 되어, 그 중에 한 기계가 갑자기 이상동작을 일으킬 경우 즉각적인 원인파악과 조치를 취하기가 매우 어렵다. 결국 가공시스템 내에 정지된 공작기계가 생기거나 공작물의 가공정도가 불균일하게 되는 문제가 종종 생긴다. 그래서 요사이 작업자의 이상상태 파악을 위해 감시시스템을 설치하여 즉시 원인을 파악할 수 있도록 하고, 더 나아가서 자동제어 기능을 추가해서 실시간으로 이상상태를 보완, 보정하도록 시도하고 있다. 현재 공작기계에서 상태감시로 문제가 되고 있는 것은 열변형의 감시와 보정으로, 기계가 유연 생산시스템 내에서 여러 종류의 가공조건과 가공물을 수시로 바꿀 경우 기계 내의 열형은 계속해서 변동되어 일반적으로 생각하는 정상상태의 열변형 문제와는 거리가 있다. 특히 오전 작업시작시 무부하 구동으로 발생하는 비정상 상태의 열변형이라든가, 절삭속도 변동에 따른 열변형 변화 등은 공작물의 가공정도에 큰 영향을 미친다. 결국 비정상 상태의 열변형을 감시하고 보정해야 할 필요성이 중대되고 있다.

한편 열변형 보정을 위해서 열변위를 측정하는 방법으로는 여러가지가 있을 수 있으나, 공작기계에서 사용하는 실용적이고 저가의 측정 방법은 해당 부위의 열변형과 주위의 온도를 측정하여 서로간의 상관관계를 추출해서 주위온도 측정만으로 해당 부위의 열변형을 역으로 예측하는 방법을 사용하고 있다. 이 방법은 온도센서를 부착하는 위치에 따라 예측 열변형의 신뢰성이 크게 달라지고 측정센서의 갯수도 신뢰성에 영향을 미쳐서 열변형 예측시스템의 실용화를 위해서는 센서의 위치와 갯수의 결정이 매우 중요하다.

본 연구에서는 공작기계의 신뢰성있는 열변형 예측을 위해 온도센서의 부착 위치를 최적으로 결정하는 방법을 일점 센서와 다점 센서일 경우로 나누어 제시하였다.

### 2. 회기 분석법에 의한 열변형 예측

공작기계의 열변형은 불가피한 현상이므로 가능한한 열변형을 최소로 하기 위해 열원을 제거하거나 억제하고, 열전도를 막기 위해 냉각자켓이나 Shower등을 사용한다. 그러나 정밀가공을 하는 공작기계에서는 잔류 열로 인한 열변형 값이 작지 않아 반드시 열변형을 측정하고, 상응한 보정을 해 주어야 한다. 공작기계의 열변형은 Laser나 일반 Gap Sensor에 의해 직접 측정할 수도 있지만 기계 내에 설치하여 열변형을 측정하기에는 첫째로 가격 면에서 부담이 많이 되고 측정 부위가 많으며, 둘째로는 기계 가공시 절삭유, 침, 축의 이동등에 의해 많은 제약이 뒤따른다. 그래서 관심있는 부위의 열변형과 주위의 온도간에 상관계수를 계산하고 이 계수를 이용하여 역으로 온도만을 측정하여 관심 부위의 열변형을 예측하는 회기 분석법을 사용한다. 열변형과 온도간의 기본식은 식(1)과 같이 나타나는데

$$\Delta l = \alpha \cdot \Delta \varphi \cdot l \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

( $\Delta l$ : 열변형,  $\alpha$ : 열팽창계수,  $\Delta \varphi$ : 온도변화,  $l$ : 전체길이)

이 식을 일단 고정 Beam 형태의 열변형에 적용한다면, 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\delta_x = \alpha \int_0^l \varphi(x) dx \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

( $\delta_x$ :  $x$  방향의 전체 열변형,  $\varphi(x)$ : 각 위치에서의 온도)

여기서,  $\varphi(x)$ 는 측정기법상 무한개의 센서로 측정을 해야 하므로 실제로 적용이 불가능하기 때문에 다수의 온도센서로 측정이 가능하도록 식(2)을 식(3)의 형태로 변환시켜야 한다.

$$\delta_x = C_0 + \sum_{i=1}^n C_i \cdot \varphi_i \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

( $C_0, C_i$ : 회귀계수,  $\varphi_i$ : 각 위치의 온도)

식(3)은 수학적으로 회귀모형(regressive model)이 되어  $\varphi_i$ 와  $\delta_s$ 가 대응되도록 하면 계수  $C_0 \sim C_n$ 을 최소자승법에 의해 계산할 수 있다. 회기 분석법에 의한 열변형 예측에서 문제점을 파악하기 위해 일단 고정 Beam형태의 실험 장치를 그림 1과 같이 제작하였다.

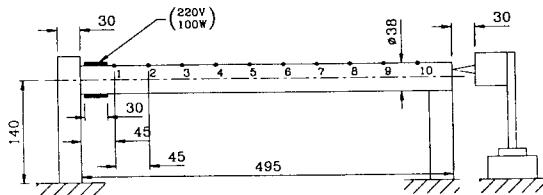
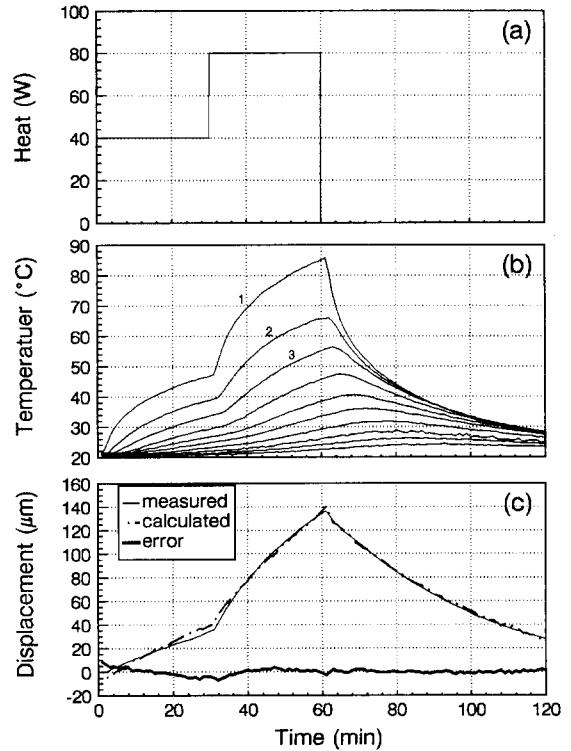


Fig. 1 : Experimental Set-up for Thermal Displacement

그림과 같이 고정지지대에 Beam을 고정시켜 열변위를 자유단에서만 일어나게 하였고, 고정지지대 근처에 원통 열원을 설치해 열을 가하였다. Beam에 전달되는 열은 분산되어 있는 10개의 열전대에 의해 온도가 측정되고 자유단에서의 열변위는 레이저 변위계로 측정하였다. 그리고 자유단에서 상하 방향의 열변위를 억제하기 위해 반침대를 설치하였다. 열변위 실험은 2가지를 행하였는데, 발열과 냉각이 서서히 일어나는 형태와 빠르게 여러번 일어나는 형태를 관찰하였다. 첫번째 실험에서는 열원의 발열 형태가 30분간 40W로, 계속해서 30분간 80W로 가열하고 1시간 동안 Beam을 자연 상태로 냉각시켰다. 이때 각 열전대의 온도 측정과 열변위는 1분에 1개의 데이터를 측정하였다. 그림 2-b에서 보는 바와 같이 1번센서에서는 30분 후 26°C가 상승하고 30분 후에는 40°C가 상승하였고 1시간의 냉각에 의해서는 59°C가 떨어졌다. 2~7번센서에서는 이와 비슷한 형태의 발열, 냉각곡선을 보이고 있으며, 반면 8~10번센서에서는 완만한 곡선만을 보이고 있다. 여기서 나타나는 현상은 열원에서 멀리 떨어진 센서일수록 열원의 온도변화에 대해 시간지연이 존재하고 열원의 온도변화가 시간적으로 평균화가 되어 나타난다. Beam에서의 온도변화는 자유단에서의 열변위로 나타내는데 변위곡선에서 열원의 온도변화가 뚜렷이 나타나고 있다.(열변위 형태 A) 즉 공급열이 증가하면 변위곡선의 기울기가 증가한다. 이와 같이 측정된 10점에서의 온도 데이터와 변위데이터를 이용해서  $C_1 \sim C_{10}$ 의 계수를 최소자승법에 의해 계산하면 그림 2-d와 같다. 이 계수값에 역으로 온도데이터를 부여하면 예측 열변위곡선이 만들어 진다. 그림 2-c에 보이는 바와 같이 실제 값에 거의 근접함을 알 수 있고, 다만 가열 초기와 공급 열량의 변화가 되는 시간대에

예측 열변위의 오차가 최대 8.5μm로서 다소 크게 생기고 있다.



$C_1$	1.69	$C_6$	4.33
$C_2$	-2.94	$C_7$	0.29
$C_3$	3.67	$C_8$	0.73
$C_4$	3.87	$C_9$	2.38
$C_5$	-6.84	$C_{10}$	-0.45

Fig. 2 : Thermal Displacement with long time Heating and Cooling Form (Type A)

그런데 이 계수값은 외부의 냉각조건에 매우 민감해서 일부 측정점의 냉각조건이 변화하면 전체 계수가 크게 달라진다. 즉 회귀계수가 여름에 만들어지고, 겨울에 난방용 공기나 복사열의 방향이 달라져 공작기계의 각 위치 냉각 조건이 변화하였을 때 사용하면 계산된 예측 열변위는 큰 오차를 갖게 된다. 그래서 주위 조건의 변화 추이를 계절별로 파악하고, 계수 결정에 고려가 되어야 한다. 또한 예측 열변위의 값이 외부 냉각조건의 불균일로 인한 영향을 최소로 하기 위해 측정 센서의 갯수를 최소로 해야 한다.

두번째 실험에서는 발열형태가 10분씩 가열과 냉각을 번갈아 시키는 형태로 40W의 열을 20분 주기로 10분간 지속시켰다. 총 측정 시간은 2시간으로 1번 센서에서 명확한 온도 변화가 생기고 있다. 여기서도 1~5번 센서는 시

간 지연과 열원의 온도변화 현상이 나타난다. 열변위 곡선에서는 톱 모양의 형태가 나타나고(열변위 형태 B), 예측 열변위와의 오차는  $\pm 1.9\mu\text{m}$ 로서 열변위 형태 A보다 잘 일치하고 있다.

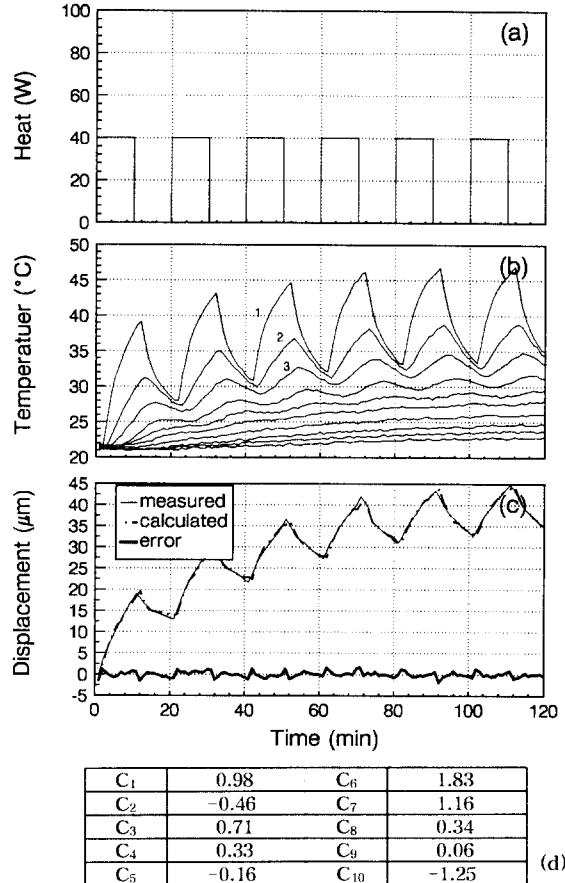


Fig. 3 : Thermal Displacement with Short Time Heating and Cooling Form (Type B)

만약 Beam이라는 열변위 시스템을 잘 표현한 회귀계수가 있다면 열변위 형태 A와 B를 동시에 잘 표현할 수 있을 것이다. 그러나 형태 A와 B에서 계산된 계수는 서로 달라서 형태 B의 계수에 의한 형태 A의 곡선 표시에는 무리가 있을 것으로 예상된다. 이러한 사실을 확인하기 위해 형태 B의 계수에 형태 A의 온도 데이터를 부여해서 열변위 곡선을 그림 4와 같이 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 최대 오차가  $32.3\mu\text{m}$ 로서 형태 A의 열변위 곡선을 잘 표현하지 못했음을 알 수 있다. 즉 열원의 온도변화의 형태에 따라 회귀계수 값은 같은 구조물에서 다르게 계산되어진다. 그래서 열변위 형태 A와 B를 최소의 오차로 동시에 만족하는 계수 계산방법이 필요하다.

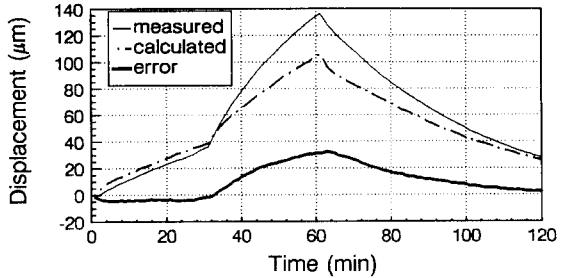


Fig. 4 : Calculated Thermal Displacement Type A with Coefficient of Type B

3. 일점 온도센서를 사용할 때 센서의 최적위치 결정  
공작기계의 열변형을 정확히 예측하기 위해서는 많은 수의 온도센서를 기계에 부착하여 각 부위에서 진행되는 온도변화를 정확히 파악해야 한다. 그러나 상품화된 공작기계에 다수의 온도센서를 부착하기에는 센서의 관리 및 고장증대등에 문제가 있어 센서의 갯수가 가능한한 최소가 되어야 한다. 그래서 관심대상 부위의 열변형을 가장 잘 표현할 수 있는 열원 근처의 최적 센서위치와 갯수를 결정 할 필요가 있다. 우선 1개의 온도센서를 부착하여 열변형을 예측할 경우를 살펴보면, 이미 그림 2와 3에서 보였듯이 열원에 가장 가까이 있는 센서 1의 온도변화는 열원의 공급열량 변화를 가장 잘 나타내지만, 열원과 열변형 측정 위치가 어느 정도 거리를 두고 있는 대부분의 경우 두점간의 전체 열변위를 나타내는 데는 알맞은 위치가 되지 못한다. 그리고 열원과 열변형 측정 위치 사이의 중간점인 센서 5번의 경우는 전체 열전도 경로상의 평균온도를 나타내지 못하고 열원 부근의 급격한 온도변화, 즉 열팽창에 대응되지 못해 일점 온도센서의 위치로서 적당하지 않다.

그래서 열변형 곡선과 온도곡선의 형태를 비교함으로서 어떤 온도곡선이 열변형의 변화를 잘 나타내는지 파악하여 선정도록 한다. 이 목적을 위해서 측정된 온도곡선과 열변형 데이터간의 상관관계를 관찰하면 각 위치의 온도곡선과 열변형 곡선간의 형태 유사성을 파악할 수 있다. 수학적으로 상관계수  $\gamma$ 은 식4와 같이 표현할 수 있는데 이식의 물리적인 의미는  $x$ 에 의해 설명할 수 있는 부분이  $y$ 의 총변동분에서 차지하는 비율이다.

$$\gamma = \frac{\sum(x-\bar{x}) \cdot (y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2 \cdot (y-\bar{y})^2}} \quad \dots \quad (4)$$

$\gamma$ 의 범위는  $-1 \leq \gamma \leq 1$ 로서  $\gamma=1$ 인 경우  $x$ 에 의해  $y$ 를 완전히 설명할 수 있음을 나타낸다. 그러면 그림 2를 예로 들어 각 점이 나타내는 상관계수를 계산해 보면 표 1과 같다.

Table 1 : Correlation Coefficient of Fig.2

$\gamma_1$	0.81	$\gamma_6$	0.79
$\gamma_2$	0.94	$\gamma_7$	0.68
$\gamma_3$	0.99	$\gamma_8$	0.58
$\gamma_4$	0.97	$\gamma_9$	0.46
$\gamma_5$	0.90	$\gamma_{10}$	0.34

표 1에 의하면 센서 3이 열변형을 가장 잘 표현하고 두 번째로 센서 4가 잘 표현할 수 있다. 이 상관계수의 값이 열변형을 예측하는 능력과 일치하는지를 증명하기 위해서 열변형을 1개의 센서에 의해서 예측할 경우, 열변형 곡선과의 오차를 그림 5에 나타내었다. 여기서는 센서 1, 2, 3, 4, 8, 에 대한 오차를 계산하였다.

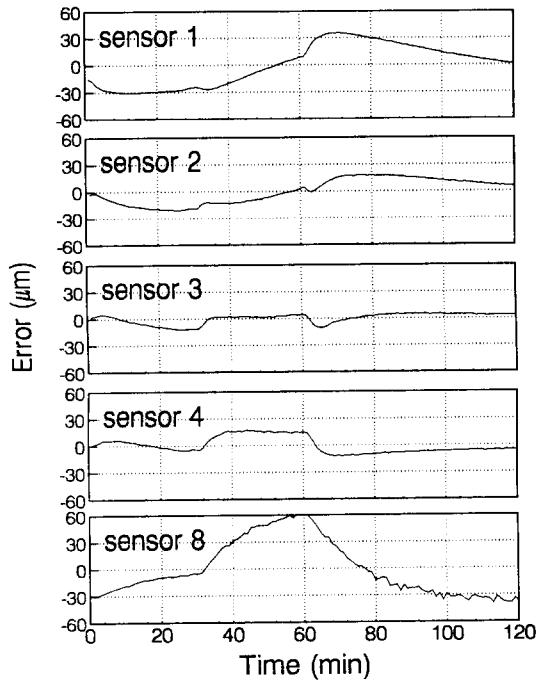


Fig. 5 : Prediction Error of Thermal Displacement with Sensors 1, 2, 3, 4, 8

그림 5에서 보듯이 센서 3에서 예측 오차가 가장 작고 상관계수가 작을 수록 오차가 커지고 있다. 이 결과에서 그림 2와 같은 발열형태는 센서 3에서 가장 잘 열변형을 예측할 수 있음을 알 수 있다. 그런데 그림 3과 같은 발열 형태는 앞의 그림 2와 최적 센서 위치를 다르게 나타내서 작업조건에 따른 센서의 위치 결정이 필요한 것으로 나타나고 있다. 표 2에는 그림 3에 대한 상관계수를 나타내었다.

Table 2 : Correlation Coefficient of Fig. 3

$\gamma_1$	0.81	$\gamma_6$	0.91
$\gamma_2$	0.93	$\gamma_7$	0.91
$\gamma_3$	0.91	$\gamma_8$	0.90
$\gamma_4$	0.89	$\gamma_9$	0.89
$\gamma_5$	0.90	$\gamma_{10}$	0.87

표 2에서 보듯이 그림 3의 열변형 곡선은 모든 센서에서 측정되는 온도곡선과 상관관계가 매우 높고, 센서 2에서의 온도 변화 곡선과 형태의 유사성이 가장 큰 것으로 나타나고 있다. 이와 같이 상관계수의 값이 대부분 크고, 차이가 크지 않은 때는 한두 군데의 센서로서 열변형의 변화를 표현하는 것이 어렵다. 또한 센서 1의 상관계수 값이 10개의 센서중 가장 작아, 일반적으로 예상되는 1번 센서의 측정 타당성이 그림 3과 같은 발열형태에서는 잘 맞지 않는다. 그래서 공작기계의 열변형 예측을 위해서는 상용의 작업 조건상에서 형태 A와 B의 조합 발열형태가 나타나도록 운전을 해서 형태 A와 B에 적응한 계수를 구하고, 여기서

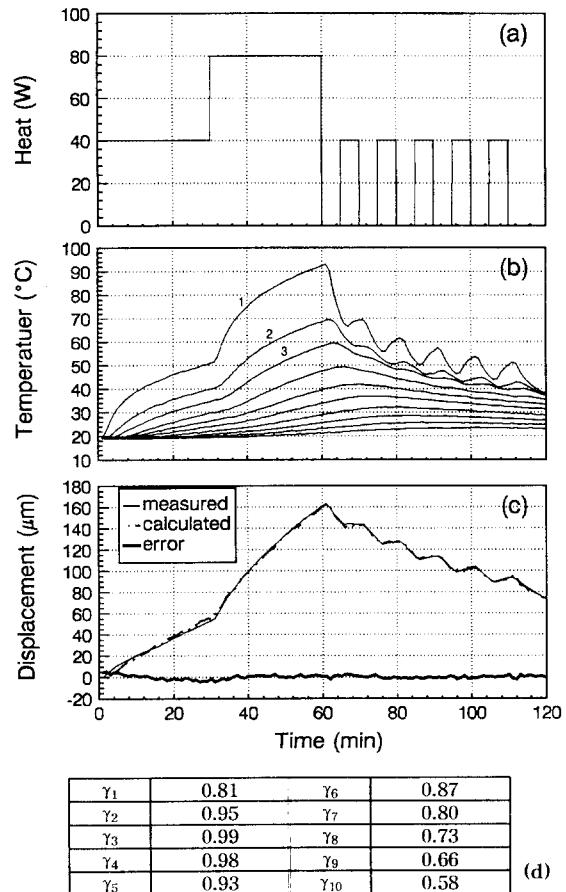


Fig. 6 : Combined Heat Generation for the Optimized Sensor Position

상관계수가 가장 큰 센서 위치를 선택해 최적 센서 위치로 결정한다. 그림 6에는 그림 2와 3의 발열형태를 조화시켜 열을 가함으로서 서서히 증감하는 온도변화와 빈번한 온도 변화를 나타내고 있고 이에 적응하도록 계수  $C_i$ 를 결정하였다. 여기서 최적의 온도 측정점은 센서 3번으로 나타났다.

**4. 다점 온도센서를 사용할 때 센서의 최적 위치 결정**  
 열변위 예측시스템의 실용성으로 보아 일점 온도센서에 의한 열변위 예측이 유리하기는 하지만, 많은 경우 일점 온도센서에 의한 예측이 허용오차를 넘어가기 때문에 2~3개의 온도센서에 의한 열변위 예측이 필요하다. 온도센서는 갯수를 증가시킬수록 예측이 정확해지는 경향이 있지만 허용 예측 오차가 만족되는 한 최소의 온도센서를 사용하는 것이 좋다. 열변형 예측은 부착된 온도센서에서 측정된 온도곡선의 조합에 의해 이루어지기 때문에 센서의 갯수는 동일해도 센서의 위치 조합에 따라 예측 오차가 크게 달라진다. 센서의 위치 선택은 앞에서 설명한 상관계수를 이용해서 상관계수가 큰 순으로 선택할 수도 있으나, 상관계수가 비교 곡선간의 시간 지연을 잘 나타내지 못해 오히려 예측오차를 크게 하는 경우가 많다. 그래서 그림 7과 같은 발열조건에서 2점 온도센서를 갖는 경우 빈번한 열원의 온도변화와 서서히 진행되는 온도변화에 대응하기 위해 그림 1에서 열원 근처의 센서 1과 열원과 열변형 측정점의 중간 점 센서 5를 최적의 센서 위치로 결정한다. 그리고 3점과 4점 온도센서가 필요하면 센서 1, 5, 2와 센서 1, 5, 2, 6을 선택하여 최적의 위치로 결정한다. 이것의 타당성을 증명하기 위해서 그림 7에 센서 1과 5의 조합과 상관계수가 큰 센서 3과 4의 조합 예측오차를 비교하였다. 열변형 예측오차는 센서 1과 5의 조합에서 최대  $6.4\mu\text{m}$ 와 센서 3과 4에서 최대  $14.1\mu\text{m}$ 의 오차를 보여서 센서 1과 5의 조합이 2배이상의 정확성을 나타낸다.

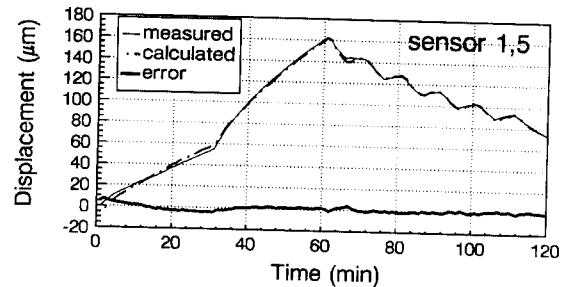
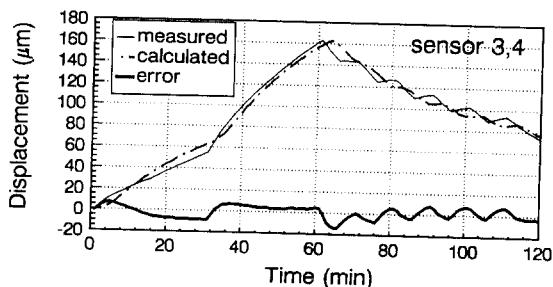


Fig. 7 : Comparison of Thermal Displacement Prediction with Sensor 1, 5 and Sensor 3, 4

## 5. 결론

공작기계의 신뢰성있는 열변형 예측을 위해 온도센서의 최적 부착 위치를 결정하는 방법을 일점 센서와 다점 센서를 사용하는 경우로 나누어 제시하였다.

- 1) 열변형의 형태에 따라 회귀계수와 예측오차는 크게 변화한다.
- 2) 다양한 열변형 형태에 적응한 회귀계수를 얻기 위해 복합 발열형태를 제시하였다.
- 3) 열변형 예측에 한개의 센서를 사용하는 경우, 상관계수가 가장 큰 위치를 최적 위치로 결정한다.
- 4) 열변형 예측에 2개의 센서를 사용하는 경우, 열원에 근접한 위치와 열원과 열변형 측정점 중간위치를 최적 위치로 결정한다.

## 참고문헌

- [1] Yoshida, Y. : Research on Thermal Deformation of a Vertical Milling Machine. Mechanical Engineering Lab. No. 82, 1995.3
- [2] Weck, M. : Werkzeugmaschinen II. VDI-Verlag, 1991.
- [3] Attia, M. : Thermal Aspects in Manufacturing. Winter Annual Meeting of ASME, 1988.12
- [4] Jedrzejewski, J. : A new Approach to Modelling Thermal Behaviour of a Machine Tools under Service Conditions. Annals of the CIRP Vol. 41/1/1992, pp455~458
- [5] Spur, G. : Einflüsse der Umbauteil auf das thermische Verhalten von Hauptspindellagerungen. Annals of the CIRP Vol. 21/1/1977, pp199~203
- [6] Haas, P. : Thermisches Verhalten von Werkzeugmaschinen. Diss. TU-Berlin, 1975