

회귀분석을 이용한 열변형 오차 모델링에 관한 연구

Research on the thermal deformation modeling using by regression analysis

김희술(영남대), 고태조(영남대), 김선호(한국기계연구원), 김형식(영남대원), 정종운(영남대원)

Abstract

There are many factors in machine tool error. These are thermal deformation, geometric error, machine's part assembly error, error caused by tool bending. Among them thermal error is 70% of total error of machine tool.

Prediction of thermal error is very difficult, because of nonlinear tendency of machine tool deformation. In this study, we tried thermal error prediction by using multi regression analysis.

Key words : thermal error(열변형), prediction(예측) machine tool error (공작기계 오차), multi regression analysis(다중 회귀분석)

1. 서론

공작기계에서 발생하는 오차는 여러 가지가 있다. 3축 공작기계의 경우, 공작기계의 작동 영역에서의 기하학적 오차, 공작기계의 부품들 간의 잘못된 결합에 의한 오차, 공작기계 자체의 온도 상승에 의한 열변형 오차, 가공시 발생하는 공구 자체의 온도 상승에 의한 오차, 공구의 잘못된 장착에 의한 오차, 공구의 휨에 의한 오차 등 여러 가지 요인이 있다. 특히 정밀 가공에 있어서는 이 모든 오차 요인들 중에서 열변형에 의한 오차가 전체의 40~70%를 차지한다^[1]. 여러 열변형 오차 중 특히 주축의 발열에 의한 열변형 오차가 이송계 구동에 의한 것이나 또는 절삭열 등 다른 요인에 의한 발열오차보다도 영향이 매우 크다^[2]. 주축에 관한 연구는 1950년도에 체코슬로바키아에서 J. Tlustý에 의해 제안이 되었는데 그는 정전용량형센서를 이용하여 비접촉으로 주

축의 반경오차운동을 극좌표형태로 구현해내었다. 그 이후 1960년 및 70년대에 미국의 Lawrence Livermore National Laboratories, 1980년 및 90년대에 영국의 AMTRI(Advanced Manufacturing Technology Research Institute) 등에서 연구가 진행되었다.

이상적인 주축의 경우 회전운동을 제공하는 1자유도 운동만이 있고, 나머지 5자유도 운동은 오차운동에 관여한다. 이러한 오차운동은 보정으로 줄일 수가 있고, 보정하는 방법에 따라서 다르겠지만 열변형 오차의 70% 이상을 보정하였다는 결과가 발표되었다^{[3][4][5]}. 따라서 본 논문은 열변형 오차 보정을 위한 선행 단계로서 주축의 거동을 분석해 보고 그 예측을 다중 회귀분석을 통해 주축의 열변형을 예측해보기로 한다.

2. 회귀분석의 원리

회귀분석이란 특정 현상과 그 현상에 영향을 미칠 수 있는 변수들 사이의 관계를 분석하고 모형화하기 위한 통계적 기법이다. 회귀분석에서는 특정 현상과 그 현상에 영향을 미칠 수 있는 변수들 사이의 함수관계를 표현할 수 있는 모형을 이론적 근거나 경험적 판단에 의해서 설정하고, 변수들의 관측된 자료에 의해서 함수관계를 추정한다. 추정된 모형을 이용해서 추정 혹은 예측하는데 사용되어진다. 따라서 회귀분석은 사회과학, 공학, 물리학, 생물학, 경영학, 경제학, 의학 등 거의 모든 학문분야에서 가장 널리 사용되고 있는 통계적 분석방법일 것이다^[6].

본 논문에서는 열변형에 의해 발생하는 3축 방향의 오차를 종속변수로 삼고, 이 종속 변수의

변동을 설명하기 위해서 세 개의 독립변수를 각각 주축의 특정 부위 세 곳(주축 전면 3곳)을 지정하였다.

회귀 분석을 하는 기본적인 개념은 다음과 같다.

먼저 측정점을 $(x, y, z, f(x, y, z))$ 라고 한다

면 측정점들은 다음과 같이 표현 될 수 있다.
 $(x_1, y_1, z_1, f(x_1, y_1, z_1)) (x_2, y_2, z_2, f(x_2, y_2, z_2))$
 $\dots\dots (x_n, y_n, z_n, f(x_n, y_n, z_n))$ 이고 예측식을 다음과 같이 나타낸다.

$$f(x, y, z) = a + bx_i + cy_i + cz_i \quad - (1)$$

따라서 우리는 이러한 측정점들과 예측식으로 제시된 $f(x_i, y_i, z_i)$ 와의 차이를 최소로 만드는 a, b, c, d 계수를 구하기 위해 최소 제곱법을 쓰도록 하였다. 즉,

$$S = \sum_{i=1}^n (f(x_i, y_i, z_i) - f(x_i, y_i, z_i))^2 = \sum_{i=1}^n (a + bx_i + cy_i + dz_i - f(x_i, y_i, z_i))^2 \quad - (2)$$

이다. 여기서 그 실제값과 이론값과의 차이가 최소가 되기 위해서는 편도함수가 0가 되도록 하면 된다.

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial b} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial c} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial d} = 0 \quad - (3)$$

윗식을 정리하여 아래와 같은 4원 1차 연립방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} na + b\sum x_i + c\sum y_i + d\sum z_i &= \sum f(x_i + y_i + z_i) \\ a\sum x_i + b\sum x_i^2 + c\sum x_i y_i + d\sum x_i z_i &= \sum x_i f(x_i, y_i, z_i) \\ a\sum y_i + b\sum x_i y_i + c\sum y_i^2 + d\sum y_i z_i &= \sum y_i f(x_i, y_i, z_i) \\ a\sum z_i + b\sum x_i z_i + c\sum y_i z_i + d\sum z_i^2 &= \sum z_i f(x_i, y_i, z_i) \end{aligned} \quad - (4)$$

이것을 행렬로 나타내면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} n & \sum x_i & \sum y_i & \sum z_i \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i z_i \\ \sum y_i & \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i z_i \\ \sum z_i & \sum x_i z_i & \sum y_i z_i & \sum z_i^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum f(x_i, y_i, z_i) \\ \sum x_i f(x_i, y_i, z_i) \\ \sum y_i f(x_i, y_i, z_i) \\ \sum z_i f(x_i, y_i, z_i) \end{pmatrix} \quad - (5)$$

추정식 f 의 계수 a, b, c, d 와 이 추정식의 적합도를 구하는 프로그램을 Visual C++6.0을 이용하여 개발하였다. 결과는 상업용 소프트웨어인 SPSS를 이용하여 검토하였다.

3. 발열 실험

주축의 운동은 일반적으로 6가지가 있다. 즉, x, y, z 방향에 대한 3개의 선형운동과 2개의 x, y 방향에 대한 틸팅운동, 그리고 회전축에 대한 틸팅운동이 Fig 3-1처럼 존재한다^[7]. 이 중에서 회전축에 대한 틸팅운동은 자신의 운동방향과 일치하기 때문에 제외한다. 따라서 동작기계의 주축이 회전으로 인하여 발열이 일어나면 이 운동 방향으로 오차가 각각 발생하게 된다. 따라서 이러한 운동을 측정하기 위해서는 Fig. 3-2처럼 5개의 센서를 사용하여 각각의 열변형 오차를 평가해낼 수가 있는데, 이는 ISO/DIS 230-3 및 BS3800:part3:1990, 그리고 ASME B5.54-1992에 잘 나타나 있다.

Fig. 3-2에서 2번과 4번 센서는 각각 x 방향의 선형오차 및 y 방향의 틸팅오차를 평가하기 위한 것이고, 1번과 3번은 y 방향의 선형오차 및 x 방향의 틸팅오차, 그리고 센서 5는 z 는 z 방향의 선형오차를 측정하기 위한 센서이다. 센서는 eddy current형식의 비접촉식 센서를 사용하였다. 이 센서는 열에 의한 변형이 작도록 특별히 제작된 치구에 조립이 되며, 테스트바로 사용된 Mendrel도 열변형이 작은 강으로 제작되었으며 센서와의 두 거리는 250mm가 되도록 게이지기준면에서 길이가 300mm인 기준바를 사용하였다. 열변형은 일반적으로 금형가공에 많이 사용하는 크기의

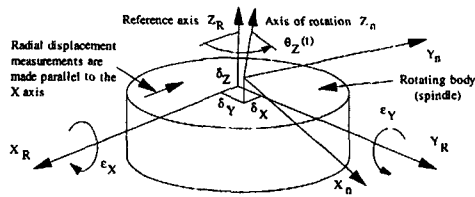


Fig 3-1 Motion and errors about an axis of rotation

Table 1과 같은 수직형 머시닝센터(AV45, 대우중합기계(주))를 이용하였다. 한편 열전대는 공작 기계의 주축 주요부에 7곳을 선택하여 장착을 하였고, 나머지는 치구에 한 개 그리고 대기의 온도를 측정할 목적으로 주축 선단 근처의 높이에 한개를 설치하여 총 9개의 열전대를 사용하였다. 열전대는 J형으로서 온도계인 IOtech의 Temps-can/1000에 연결하고 RS232C로 퍼스날 컴퓨터에 연결하여 온도상승을 측정, 저장하였다.

Table 1 Specification of machine tool

구분	단위	규격
주축	kW	11/15
	rpm	4,000
행정거리(x, y, z)	mm	820, 500, 510
이송속도(x, y, z)	m/min	20, 20, 15

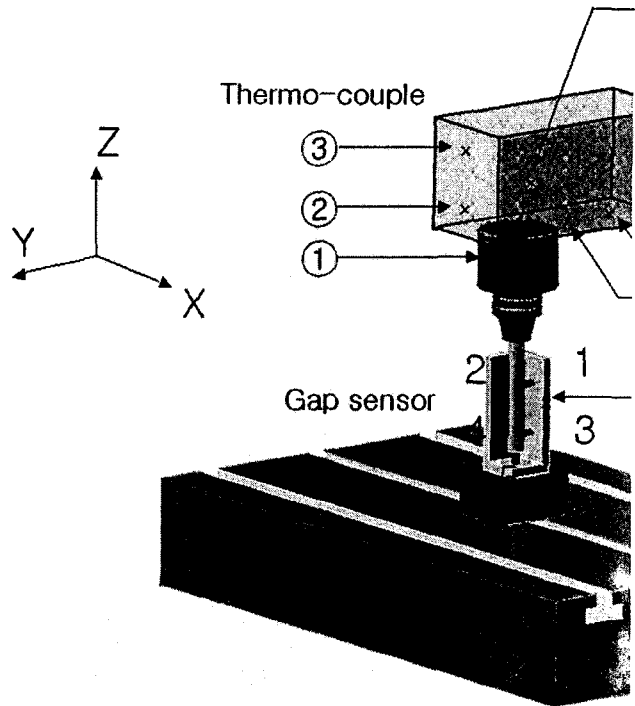


Fig 3-2 Setup for measuring thermal expansion

실험은 총 4가지를 실시하였다.

- 3000rpm으로 스피들을 1시간 회전 후 23시간 정지
- 3000rpm으로 5시간 주축 회전 후 19시간 정지
- 3000rpm으로 3시간 회전 후 2시간 정지 다시 2000rpm으로 3시간 회전 후 16시간 정지
- 3000rpm으로 3시간 회전 후 2시간 정지 다시 3000rpm으로 3시간 회전 후 16시간 정지

실험●과 실험● 실험은 회전 속도는 같고 회전 시간 (1시간 ▶ 5시간)을 다르게 하였다. 이것은 회전 시간을 달리 했을 때 특이한 결과가 나타나는지 아니면 온도에 대해서 Error가 선형적으로 변화하는지 관찰하기 위한 것이다.

실험●과 실험●는 중간에 rpm을 변화(3000rpm ▶ 2000rpm)시켜서 rpm 변화가 주축의 열변형 움직임에 어떠한 영향을 미치는지 평가하기 위한 것이다. Fig 3-3에서 Fig 3-11은 위에서 언급한

실험 4가지의 결과를 나타낸 그래프이다.

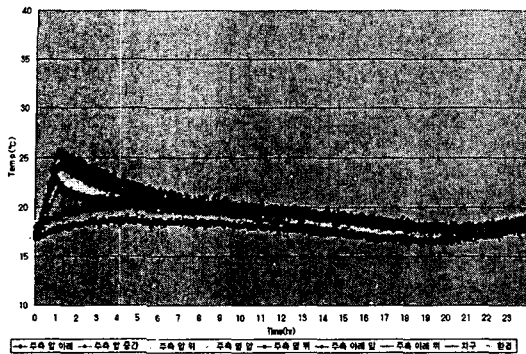


Fig 3-3 Change of temperature in experiment 1

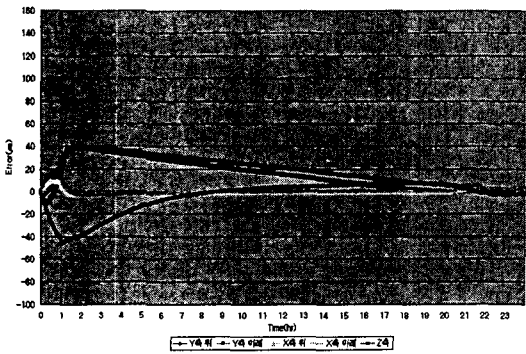


Fig 3-4 Change of error in experiment 1

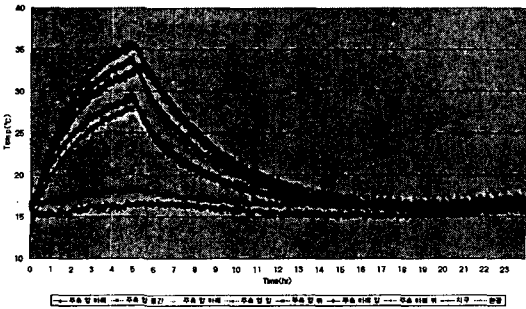


Fig 3-6 Change of temperature in experiment 2

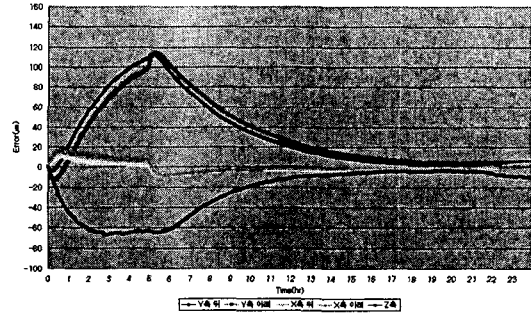


Fig 3-7 Change of error in experiment 2

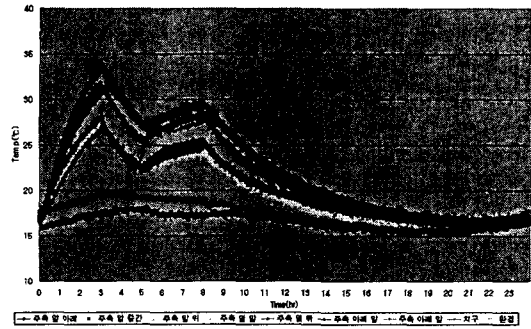


Fig 3-8 Change of temperature in experiment 3

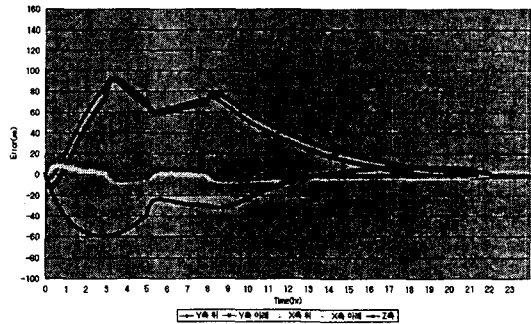


Fig 3-9 Change of error in experiment 3

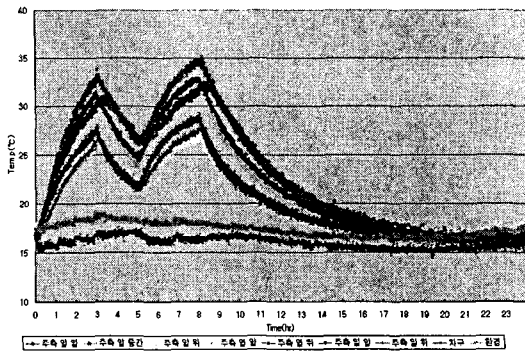


Fig 3-10 Change of temperature in experiment 4

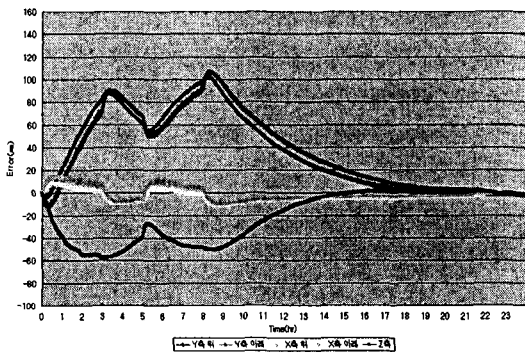


Fig 3-11 Change of error in experiment 4

위의 결과를 살펴보면 실험 1에서는 spindle이 회전하기 시작하면서 온도가 상승하는 것이 관찰되었다. 온도는 26°C까지 상승하였으며, 오차는 40μm까지 상승하는 것이 관찰된다.

Fig 3-6에서 Fig 3-7은 실험 1과는 다르게 spindle 회전 시간을 늘렸을 때의 경우이다. 당연히 온도에 따라 오차의 양이 증가하였다.

실험 3과 실험 4를 통해서도 알 수 있듯이 주축은 온도에 상승함에 따라 오차의 양이 증가하고 온도가 하강함에 따라 Error의 양이 줄어든다.

그리고 각각의 실험에서 어느 특정 온도일때 오차가 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

4. 회귀 분석

실험 1에서 실험 4까지 회귀분석을 사용하여 구한 예측식을 사용하여 각각의 실험에 대해 예측해 보았다. 예측식을 위한 대상 모델은 실험 3

으로 하였다. 회귀 분석에 사용한 프로그램은 다음과 같다.

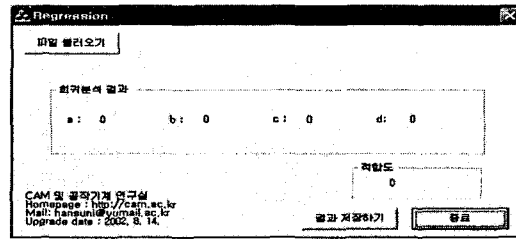


Fig 4-1 Program for regression analysis

이 프로그램은 Visual C++ 6.0 Windows 2000환경에서 최적화되도록 개발하였다.

예측식 $f(x, y, z) = a + bx_i + cy_i + dz_i$ 의 계수 a, b, c, d를 구하고 적합도를 구할 수 있다. 여기에서 구한 계수와 실제 온도 데이터를 이용하여 예측 Error를 구하였다. 예측 결과 x, y 축과 z 축은 모두 적합도가 0.9 이상 나왔다. 이것으로 볼 때 예측한 오차는 상당히 신뢰성이 있다고 할 수 있다.

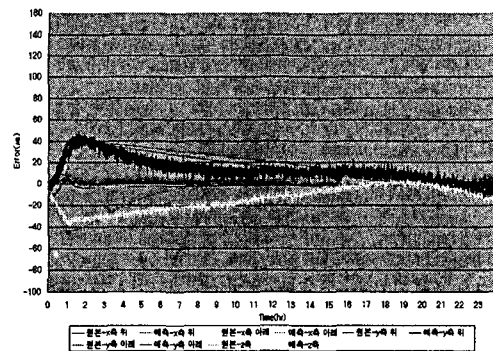


Fig 4-2 Prediction and real error in experiment 1

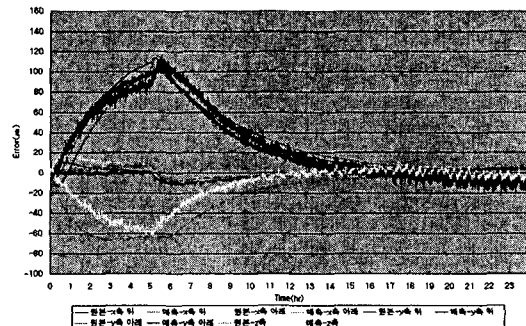


Fig 4-3 Prediction and real error in experiment 2

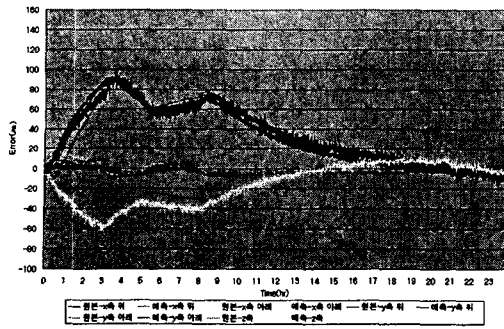


Fig 4-4 Prediction and real error in experiment 3

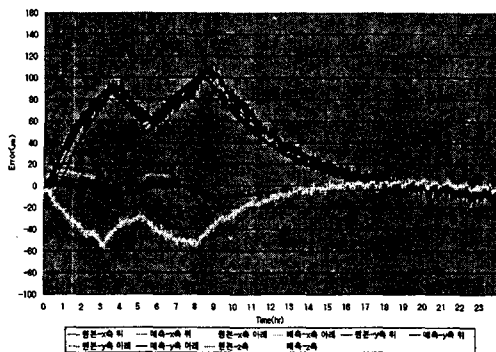


Fig 4-5 Prediction and real error in experiment 4

Fig 4-2 ~ Fig 4-5는 회귀분석으로 예측한 Error 값을 원래의 Error 값과 같이 그래프로 나타낸 것이다. y축의 경우는 거의 일치하고 x 축과 z 축의 경우는 80%이상 일치하는 것을 볼 수 있다. 예측한 오차 그래프에서 그래프가 많이 떨리는 것은 예측시에 사용한 온도 data 자체가 많이 떨리기 때문에 나타난 결과이다. 보다 온도 측정이 정밀하게 이루어지면 보다 정확한 오차 예측값을 얻을 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 주축의 열변형 오차를 예측하기 위한 여러 방법 중 다중 회귀분석법을 사용하여 오차를 예측해보았다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 주축의 열변형 오차를 예측하는데 다중회귀분석법이 상당히 유용함을 알 수 있었다.
- (2) 독립변수로 사용되는 온도의 측정시 세심한 주의가 필요함을 알 수 있다. 노이즈로 인한 온도 data의

떨림으로 인해서 예측값의 노이즈가 많이 발생함을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] J. Bran, 1990, " International Status of Thermal Error Research(1990)" Annals of the CIRP, Vol. 39, No2, pp645-656
- [2]N. Srinivasa, J. C. Ziegert, "Automated measurement and compensation of thermally induced error maps in machine tools," Precision Engineering, Vol. 19, pp. 112-132, 199
- [3] H. J. Park, S. W. Lee, K. I. Lee, Y. J. Cho, "Thermal error measurement and compensation techniques for the 5 degree of freedom spindle drifts in CNC machine tools,"
- [4]J. S. Chen, G. Chiou, "Quick testing and modeling of thermally-induced errors of CNC machine tools," Int. J. of Mach. Tools and Manufact., Vol. 35, No. 7, pp. 1063-1074, 1995.
- [5]J. S. Chen, "Neural network based modeling and error compensation of thermally-induced spindle errors,"Int. J. of Adv. Manufact. Technol., Vol. 12, No. 4, pp. 303-308, 1996.
- [6] 성웅현, 이승천, "회귀분석", pp1-2
- [7]. A. H. Slocum, Precision Machine Design, Prentice-Hall International Ed., 1992