열변형 오차 보상에 의한 초정밀 선반의 가공 정밀도 향상

Thermal Error Modeling for Error Compensation on a High Precision Lathe

*#김병석 송영찬 박천홍

*#B.-S. Kim(bkim@kimm.re.kr), Y.-C. Song, C.-H. Park

한국기계연구원 지능형생산시스템연구본부

Key words : Thermal error, Error compensation, Machine accuracy

1. 서론

공작기계의 가공 정밀도는 가공된 생산물의 치수 정밀도에 직접적인 영향을 미치며, 증대되고 있는 기계 가공품의 고품질화를 위해 열에 기인한 오차와 기하학적인 오차는 지난 수십 년 동안 많은 과학기술자에 의해 연구되어 왔다[1,2]. 열에 기인한 오차는 전체 기계가공 오차의 40-70% 정도를 차지하며 기계 가공시 오차를 유발하는 가장 큰 인자 중의 하나이다[1]. 열에 기인한 오차는 준정적인(Quasi-static) 오차로 시간에 따라 느리게 변하며 공작 기계의 구조와 밀접한 관련이 있다. 일반적으로 사용되는 실험적인 열오차 모델은 어느 특정 순간에 공작기계의 열변형은 그 순간의 온도 분포에 의존한다고 가정하고 열변형과 온도 분포와의 관계를 찾아낸다[3-5]. 이와 같은 정적인 오차 모델은 작업 환경이 달라지면 부정확해지는 경향이 있다.

보다 강인한 모델을 얻기 위하여 공작기계의 열탄성 과정에 대한 동적모델이 고려되어 왔는데, Moriwaki[6]는 공작기계에서 주축 속도, 대기 온도, 열변형 사이의 상관 관계를 실험적인 전달함수로 유도하고 유도된 전달함수를 열변형 보상에 사용할 것을 제안하였다. Li[7]는 주축의 열 오차를 주축의 속도로부터 예측하기 위해 자기회기(Auto-regress, AR) 모델을 이용하였다. Hong[8]은 정적인 오차 모델이 환경의 변화에 따라 부정확해지는 원인이 가성 히스테리시스(Pseudo-hysteresis) 때문임을 보이고 공작기계의 열변형을 예측하기 위하여 선형 출력 오차(Output error, OE) 모델을 사용할 것을 제안하였다.

본 연구에서는 열탄성 과정의 모델을 위하여 상태 공간(state-space) 모델을 사용하였다. 컴퓨터 시뮬레이션에서 상태 공간 모델은 AR, OE를 포함한 다른 선형 매개변수 모델 보다 열변형의 동적 거동을 예측하는데 더 나은 성능을 보여주는 것으로 나타났다. 다른 연구들이 일반적인 공작기계에서 수십 마이크론 크기의 열오차를 다룬데 반하여 본 연구에서는 초정밀 기계의 나노 레벨 크기의 열오차 보상을 목적으로 하며, 주로 1~2 시간이 소요되는 초정밀 선반의 기계 가공에 있어서 10~13분의 주기에 크기가 대략 200 나노미터 정도로 나타나는 열오차를 대상으로 한다..

2. 실험 장비

실험에 사용된 초정밀 선반은 선형 모터(Linear motor)와 유정압 베어링이 장착된 X-, Z-축을 가지고 있다. Fig. 1에 사용된 초정밀 선반을 보이고 있는데, 각 축의 위치 검출을 위해 사용된 엔코더(Encoder)는 10 나노미터의 해상도를 가지고 있다. 기계 주위를 철판으로 공간을 만들어 고립시킨 후 기계 주위의 대기온도 변화는 약 ±0.2 ℃ 정도를 보이는 것으로 측정되었다. 유정압 베어링에 공급되는 오일은 오일 냉각기에 의하여 온도가 유지되고 있는데 베어링 출구부에서 오일 온도를 측정 하였을 때 약 ±0.13 ℃ 정도를 보였다. 주축과 유정압 베어링이 꺼진 상태에서 주축과 공구대 사이의 거리는 기계 주위 온도의 변화에 따라 약 70 나노미터의 변동을 보였으나, 주축, 유정압 베어링, 서보 제어기가 모두 켜져서 기계가 가공할 준비가 된 상태에서는 상대변위의 크기가 200 나노미터 정도로 나타났다.

다이아몬드 공구를 사용한 선삭시 Fig. 2에 표시한 것처럼 가공면에 열변형과 진직도 오차에 의해 물결 형태의 형상 오차가 나타났다. 열오차를 보상하기 전에 우선 X-축의 진직도와 편요각(Yaw) 오차를 보상하기 위하여 X-축의 한쪽면에 두 개의 능동제어 모세관(Actively controlled capillary, ACC)[9]을 설치하였다. ACC는 내부에 피에죠 엑츄에이터(Piezo actuator)가 있어서 유정압 베어링에 공급되는 오일의 압력을 조정할 수 있는 구조를 가지고 있는데 진직도 오차와 편요각 오차가 가능한 최소가 되도록 실험을 통하여 피에죠 엑츄에이터의 입력전압을 설정하였다. ACC에 의한 오차 보정 후, X-축의 진직도 오차는 50 나노미터로 편요각 오차는 0.15 arcsec로 나타났다.

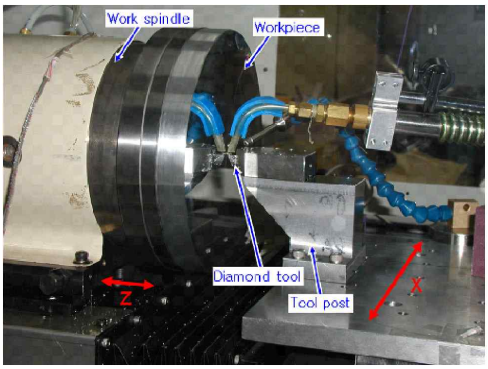

Fig. 1 Picture of a high precision lathe

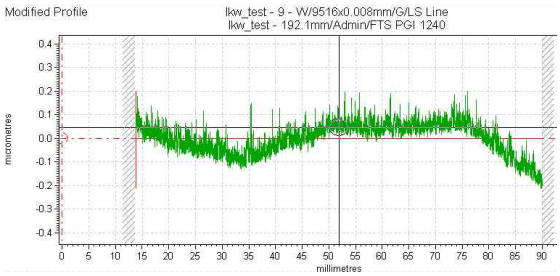

Fig. 2 Measured error on a workpiece surface due to thermal deformation and straightness error

3. 선형 열탄성 모델

온도 입력에 대한 열오차 출력의 관계식을 얻기 위해 여러 개의 온도 센서를 실험 기계에 부착하여 매 10초마다 주축과 공구대 사이의 상대 변위와 함께 온도값을 기록하였는데 온도 센서는 Fig. 3에 붉은 점으로 표시한 것처럼, 베드, 주축 상단, 테이블, 배출 오일, 기계 주위 대기온도를 측정하도록 하였다.

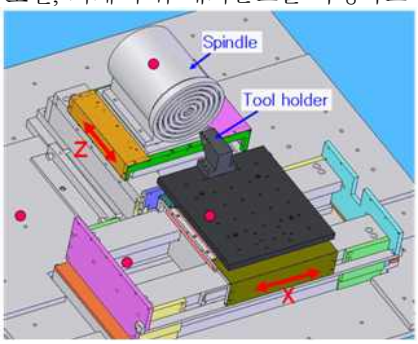

Fig. 3. Temperature sensor locations shown as red dots

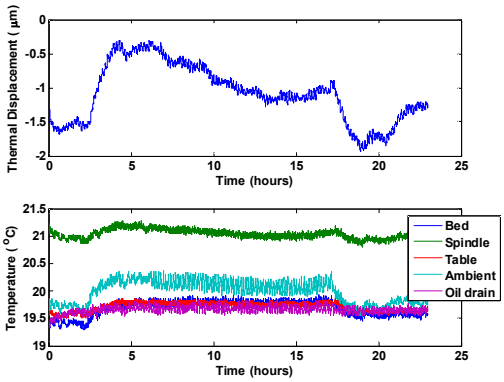

Fig. 4. Thermal error drift (above) and accompanying temperature sensor values (below)

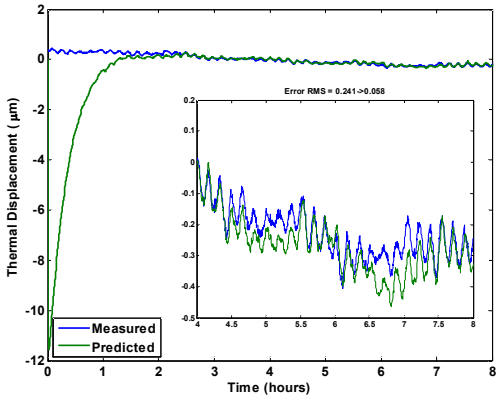

Fig. 5. Comparison of thermal error drifts: measured and predicted by a 2nd order state-space model

측정된 열변위 변화와 온도 센서의 값을 Fig. 4에 나타내었다. 1~2 시간의 기계가공시 나타나는 약 200 나노미터의 열오차 제거가 목적이므로 7~15 시간 사이의 데이터를 대상으로 1차 선형 추세를 제거한 후에 데이터를 조사하였다. 상관관계 계수(Correleration coefficient)를 계산한 결과, 배출 오일 온도가 (-0.32) 가장 열변위에 영향이 큰 것으로 나타났고 그 다음으로 주축부 온도 (0.18), 주위 대기 온도 (0.14) 순으로 나타났다. 초정밀 선반의 주위 대기 온도는 주축 온도와 가공실의 에어컨디셔너의 영향을 받기 때문에 선형 열탄성 모델의 입력값으로 배출 오일 온도와 주위 대기 온도를 선택하였다.

선형회기(Linear regression) 모델의 사용시, 오차가 커서 본 가공기에 적용할 경우 오히려 상태가 악화되는 것으로 나타났다. 가공기의 열탄성 과정의 동특성을 고려하기 위하여 ARX(Auto-regressive exogenous input), ARMAX(Auto-regressive moving-average exogenous input), BJ(Box-Jenkins), OE, 그리고 상태 공간 모델을 적용하여 비교 평가하였다. 테스트된 모델 중에서 상태 공간 모델이 실제 데이터와 가장 근사한 예측 결과를 보여주었는데 상태 공간 모델은 고차의 차분 방정식을 사용하지 않고 일차 차분 방정식의 집합으로 시스템을 표현한다. Matlab 상용 소프트웨어를 이용하여 얻어진 2차 상태 공간 모델은 다음과 같다.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Ke(k)$$
$$y(k) = Cx(k) + Du(k) + e(k)$$

여기서 $x(k)$는 상태 벡터, $u(k)$는 온도 입력 벡터, $u(k)$= [주위 온도(k), 배출 오일 온도(k)]^T, $e(k)$는 정규분포를 갖는 노이즈 벡터, $y(k)$는 열오차 출력, k는 이산 시간의 스텝(discrete-time step)으로 (시간 $t = k \times$ 샘플링 주기)의 관계를 갖는다. 사용된 샘플링 주기는 10초이며 얻어진 행렬 A, B, C, D와 초기값은

A = [0.98933, -0.024777 -0.028885, 0.72688],
B = [0.0084728, -0.026046 0.043982, -0.23742],
C = [8.8977, 0.1147],
D = [0, 0],
K = [0.067485, 0.24903]^T,
$x(0)$ = [0.21659, -14.003]^T.

노이즈 없이 초기값을 0으로 하여 시뮬레이션한 결과를 Fig. 5에 보였다. 얻어진 2차 상태 공간 모델은 실제와 다른 초기값을 가지고 시작을 하였지만 약 3시간 후에 측정된 열오차를 근사적으로 예측하는 것을 볼 수 있다. 열변형 자체가 느리게 진행하는 공정임을 고려할 때 얻어진 2차 모델도 마찬가지로 느린 동특성을 가지고 있다. 서보 제어기를 통하여 실제 기계 가공시 계산된 열오차 만큼 열오차 보상을 할 때 느린 수렴 속도는 반드시 고려해야 한다. 기계 가공시 정확한 상태 벡터의 초기값을 입력하여 열오차 모델을 구동시키는 것이 불가능하기 때문에 초기값의 영향이 소멸하기까지 약 3시간 가량 열오차 모델을 가동시킨 후 안정화된 열오차 예측값을 실제 오차 보정에 사용하여야 한다. Fig. 5에 확대된 그림에서 예측된 열오차를 보상하면 마지막 4시간 구간에 대하여 RMS 값으로 240 나노미터인 열오차가 RMS 60 나노미터로 감소함을 볼 수 있으며 얻어진 상태 공간 모델이 실제 열오차를 나노 레벨에서 잘 추종함을 알 수 있다.

4. 결론

시스템 모델링 이론을 바탕으로 초정밀 선반에서 나타난 나노미터 수준의 열오차를 보정하기 위하여 상태 공간 모델 기법을 이용한 모델링을 수행하였다. 일반적인 공작기계에서 나타나는 열오차가 수십 마이크론 수준인데 반하여 본 연구에서 다루고자 하는 열오차의 크기는 수백 나노 미터 크기라서 요구되는 열오차 모델은 작은 온도 변화에 민감하게 반응할 수 있어야 한다. 열탄성 과정의 동적거동을 예측하기 위하여 ARX, OE 등 여러 가지 모델을 테스트 하였으며 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 상태 공간 모델이 가장 뛰어난 예측 성능을 보였다. 실제 실험에 적용하여 열보정을 수행한 기계 가공의 결과는 추후의 논문을 통하여 보고될 예정이다.

참고문헌

1. Bryan, J. B., "International Status of Thermal Error Research," CIRP Annals, 39(2), 645-656, 1990.
2. Ferreira, P. M., Liu, C.R., "A method for estimating and compensating quasi-static errors of machine tools," ASME Journal of Engineering for Industry, 115, 149-159, 1993.
3. Donmez, M. A., Liu, C. R., and Barash, M. M., "General Methodology for Machine Tool Accuracy Enhancement by Error Compensation," Precision Eng., 8(4), pp. 187-196, 1986.
4. Yang, S., Yuan, J., and Ni, J., "The Improvement of Thermal Error Modeling and Compensation on Machine Tools by Neural Network," Int. J. Machine Tools and Manufacture, 36(4), 527-537, 1996.
5. Yang, J., Yuan, J., and Ni, J., "Thermal Error Mode Analysis and Robust Modeling for Error Compensation on a CNC Turning Center," Int. J. Machine Tools and Manufacture, 39, 1367-1381, 1999.
6. Moriwaki, T., and Shamoto, E., "Analysis of Thermal Deformation of an Ultraprecision Air Spindle System," CIRP Annals, 47(1), 315-319, 1998.
7. Li, S., Zhang, Y., and Zhang, G., "A Study of Pre-compensation for Thermal Errors of NC Machine Tools," Int. J. Machine Tools and Manufacture, 37(12), 1715-1719, 1997.
8. Yang, H., and Ni, J., "Dynamic Modeling for Machine Tool Thermal Error Compensation", J. Manufacturing Science and Engineering, 125, 245-253, 2003.
9. Park, C. H., Oh, Y. J., Hwang, J. H., and Lee, D. W., "Motion error compensation method for hydrostatic tables using actively controlled capillaries," J. Mechanical Science and Technology, 20(1), 51-58, 2006.