

초정밀가공기용 오차보상시스템 및 기상측정장치 개발

이대희*, 나혁민, 오창진, 김호상, 민흥기(고등기술연구원)
김민기, 임경진, 김태형(㈜대우종합기계)

Development of Error Compensation System and On the Machine Measurement System for Ultra-Precision Machine

D.H. Lee*, H.M. Na, C.J. Oh, H.S. Kim, H.G. Min(IAE)
M.G. Kim, K.J. Yim, T.H. Kim(DHI)

ABSTRACT

This paper present an error compensation system and On-Machine Measurement(OMM) system for improving the machining accuracy of ultra-precision lathe. The Fast-Tool-Servo(FTS) driven by a piezoelectric actuator is applied for error compensation system. The controller is implemented on the 32bit DSP for feedback control of piezoelectric actuator. The control system is designed to compensates three kinds of machining errors such as the straightness error of X-axis slide, the thermal growth error of the spindle, and the squareness between spindle and X-axis slide. OMM is proposed to measure the finished profile of workpiece on the machine-tool using capacitive sensor with highly accurate ruby tip probe guided by air bearing. The data acquisition system is linked to the CNC controller to get the position of each axis in real-time. Through the experiments, it is founded that the thermal growth of spindle and the squareness error between spindle and X-axis slide influenced to machining error more than straightness error of X-axis slide in small travel length. These errors were simulated as a sinusoidal signal which has very low frequency and the FTS could compensate the signal less than 30 nm. The implemented OMM system has been tested by measuring flat surface of 50 mm diameter and shows measurement error less than 400 nm

Key Words : On the Machine Measurement(기상측정장치), Ultra-precision machine(초정밀 가공기),
Fast tool servo (미소이동공구대), Piezoelectric actuator (압전액츄에이터)

1. 서론

관결정 다이아몬드 공구를 이용하는 초정밀 선삭 가공에서의 가공정밀도는 일반 가공과 달리 초정밀급의 운동이 가능한 주축 및 이송장치 그리고 ± 0.1 형상이 초정밀급으로 나뉠된 절삭공구 등이 반드시 요구된다. 또한 이와 같이 준비된 가공장치는 초정밀 가공이 원활하게 이루어지도록 열 및 진동 등의 환경적인 요인에 매우 민감하게 영향을 받으며 이로 인한 기계오차는 가공오차로 전사되므로 이에 대한 특별한 주의가 필요하다. 특히 최근에는 초정밀 선삭가공기에 요구되고 있는 공작물 가공 직경이 커지면서 동시에 가공정밀도가 높아지는 추세에 따라 각 축 슬라이드의 행정거리는 수백 mm로 길어지면서 상대적으로 나노미터 수준의 높은 분해능과 전 운동구

간에 걸쳐 높은 운동정밀도가 요구되고 있다. 이는 결과적으로 가공기의 제작비용을 지수함수적으로 증가하게 한다. 그러나 가공기의 구성요소가 고정밀도를 갖는다 할지라도 실제 가공에서는 수 μm 에 달하는 스피들의 회전운동오차와 열팽창, 이송계의 운동오차, 공작물의 변형 등에 의해 가공정밀도에 한계를 가질 수밖에 없다.

한편 초정밀가공을 통한 가공물의 표면측정과 관련하여 가공된 제품이 소품종 대량생산일 경우에는 가공된 부품의 형상이나 치수를 측정하고 검사하기 위한 별도의 공정과 장비를 두는 것이 유리하나, 단일 다품종 소량생산일 경우에는 이와 같은 방식은 비효율적일 수 있다. 따라서, 다품종 소량 가공시스템에서는 3차원 측정기(Coordinate Measuring

Machine; CMM)를 설치하여 운용하고 있다. 그러나 이는 투자비가 많이 들고 운용상 특별한 관리가 필요하며, 가공기와 측정기가 서로 다른 환경에서 운용되기 때문에 열팽창을 고려한 정확한 측정에 어려움이 있다. 특히, 3차원 측정기의 한정된 정밀도와 크기 때문에 대형 초정밀 가공물이라든지 제조공정상 가공물의 분리가 어려운 경우에는 마땅한 측정 방법이 없는 실정이다.

본 논문에서는 기계요소부품들이 가지고 있는 기계오차 및 온도에 의한 열팽창 오차 등, 가공물과 공구의 상대위치 오차를 유발하는 요소들을 온라인(On-line) 또는 오프라인(Off-line) 방법으로 측정하고 이를 미소이동공구대를 통해 보상함으로써 가공정밀도를 향상시키는 오차보상시스템을 제안하며 또한 CNC(Computer Numerical Control) 공작기계에서 가공이 완료된 후, 공구를 형상측정용 센서로 교체하여 공작물을 가공기에서 탈거하여 측정기로 옮기지 않고 가공 중에 가공형상을 파악하여 피드백함으로써 가공과 측정을 동시에 수행할 수 있는 이상측정장치를 제안하였다.

2. 오차보상시스템

2.1 오차보상시스템 구성

일반적으로 초정밀 선삭가공기의 가공정밀도는 가공기의 기하학적인 오차와 공작물을 회전시키는 스피ndl의 운동오차 및 열팽창 오차에 의해서 크게 영향을 받는다. 따라서 본 논문에서는 가공기의 기하학적인 오차 중에서 가공면의 형상오차에 직접적인 영향을 미치는 x-축 가이드웨이의 진직도 오차와 스피ndl의 열팽창 오차를 실시간으로 측정하고 이를 미소이동공구대(FTS)를 이용하여 보상하였다. 그림 2.1은 본 논문에서 적용하려는 오차보상시스템의 구성도를 나타낸다.

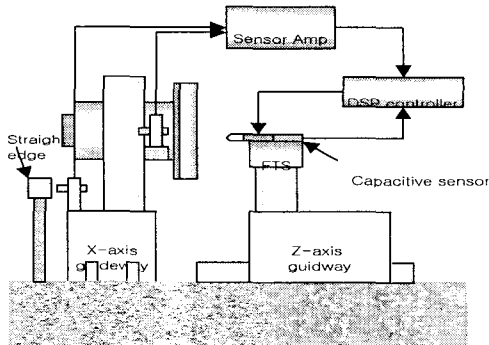


Fig. 2.1 Block diagram of error compensation system

그림 2.2는 대우중합기계가 개발한 초정밀 선삭가공기의 진직도 오차를 300mm급의 스트레이트 에지를 x-축 가이드웨이와 평행하게 설치하고 주축대 하우징에 설치한 분해능 10nm의 레이저센서를 이용하여 스피ndl을 일정한 이송속도로 움직이면서 측정한 결과를 나타낸다. 측정구간은 가공센터를 기준으로 ±90mm를 측정하였다.

그림을 통해서 알 수 있듯이 180mm 구간에 대해서 약 0.12 μ m의 진직도 오차를 가지며, 오차보상실험에 적용되는 가공구간(직경 50mm)에 대해서는 0.02 μ m의 오차를 갖는다.

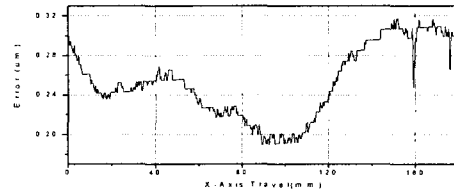


Fig. 2.2 The straightness error of x-axis slide

그림 2.3은 초정밀 선삭가공기의 스피ndl이 가공 중에 발생하는 열팽창 오차를 측정한 결과를 나타낸다. 스피ndl의 뒤쪽에 정선용량형 센서를 장착하고 스피ndl을 회전시키면서 측정하였으며, 이때 측정된 신호는 서로 다른 주파수를 갖는 측정면의 형상오차 성분과 열팽창 오차성분이 서로 중첩되어 있으므로 이들 신호를 분리하기 위해서 저주파 필터를 이용하여 열팽창 오차성분만을 추출하였다. 측정결과 스피ndl의 열팽창 주기는 약 35분이며, 1.25 μ m의 크기를 갖고 있음을 알 수 있다. 이는 스피ndl을 냉각시키기 위한 냉각수 온도제어기의 작동주기에 영향을 받는 것으로 판단된다.

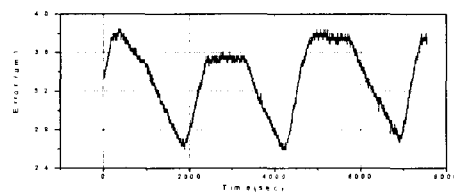


Fig. 2.3 The thermal growth error of Spindle

2.2 오차보상실험

실제 초정밀가공에 앞서 제안된 오차보상시스템의 오차보상성능을 알아보기 위해서 이미 측정된 오차성분, 즉 진직도 오차, 열팽창 오차를 입력으로 하

여 이를 미소이동공구대가 추종하도록 하는 실험을 수행하였다. 오차보상방식은 그림 2.1에 도시한 바와 같이 주축대 하우징에 설치한 레이저센서의 출력과 스펀들의 뒤쪽에 장착된 정전용량형 센서를 이용하여 진직도 오차와 열팽창 오차를 실시간으로 피드백 받아, FTS 내부 압전액츄에이터의 팽창을 측정하는 변위센서의 출력이 상기 입력신호를 추종하도록 제어하면서 가공하도록 하였다.

또한 실시간 오차보상 가공시험에서는 제어기의 연산 알고리즘을 대폭 간소화하여 피드포워드 항에 존재하는 제어 알고리즘을 사용하지 않았다. 이는 피드포워드 경로의 제어 알고리즘이 플랜트의 특성 변화에 매우 민감하여 추종제어시 전체 제어루프의 안정성에 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 그리고 노이즈에 대한 민감성을 줄이기 위해 비례계인과 적분계인을 각각 0.02와 7800으로 설정하였다.

그림 2.4는 오차보상시스템의 전체 동작흐름을 나타낸다. 제어기인 DSP 시스템의 전원을 켜 다음, 외부로부터 입력되는 준비신호를 기다린다. 이 신호가 인가되면 다음으로 오차보상을 위한 제어시작신호를 체크한다. 기본적으로 이 신호는 PC-NC와 동기화를 위해 NC로부터 받을 수 있으며, 또한 제어기의 메뉴얼 스위치를 이용하여 인가할 수 있다. NC와 관련한 신호는 스타트 버튼에 대해서 low signal을 제어정지신호와 관련에서는 high signal을 체크한다. 최종적으로 진직도 오차성분과 스펀들의 열팽창 오차성분을 보상한 후, 제어정지신호와 함께 프로그램은 다시 오차보상을 하기 위해서 준비신호를 기다린다. 만약 도중에 프로그램을 중지하려면 동작정지 스위치를 사용하여 프로그램을 종료한다.

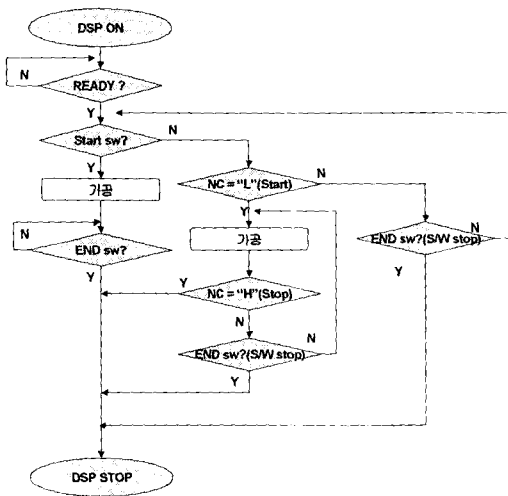


Fig. 2.4 Flow chart of control algorithm

오차성분의 측정결과로부터 조정밀 선삭가공기에 나타나는 종합적인 오차성분이 진폭 1.5 μm 이내에서 상당한 저주파 성분을 가지고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 시스템의 오차보상능을 알아보기 위해서 오차보상실험에서는 이들 오차성분의외에 다른 오차성분을 고려하여 진폭이 2.5 μm 이며 1Hz의 주기를 갖는 정현파 신호를 입력신호로 하여 실시간 오차보상 실험을 수행하였다.

그림 2.5는 제안된 오차보상시스템을 이용하여 오차보상한 결과를 나타낸다. 이러한 오차성분에 대해서 제안된 시스템은 30nm의 추종오차로 만족할만한 오차보상을 하고 있음을 알 수 있다. 이를 통해서 향후 조정밀가공실험에서 목표로 하는 가공정밀도를 달성하는데 문제가 없을 것으로 판단된다.

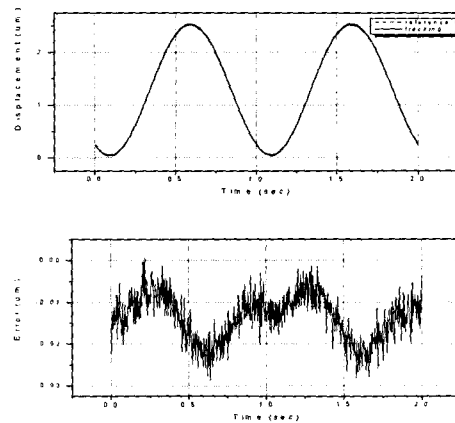


Fig. 2.5 The tracking error of FTS

3. 기상측정장치

3.1 기상측정장치 구성

본 연구에서는 비교적 구조가 간단하며, 가공 시스템에 적합한 접촉식 프로브를 이용하여 기상측정 시스템을 구성하였다. 그림 3.1은 제안된 기상측정 장치의 구성도를 나타낸다. 선정된 시스템에 대해 접촉식 프로브의 트리거 신호를 발생하기 위해서 10 nm의 분해능을 가지는 정전용량형 센서를 사용하였으며 센서와 측정 PC와 인터페이스를 위해 측정 PC에 ADC(Analog Digital Converter) 보드를 사용하였고 NC의 스킵 기능을 위해 DIO(Digital Input Output) 보드를 사용하여 NC와 통신할 수 있는 시스템을 구성하였다. 또한 기상형상 측정 정밀도를 확보하기 위해서 조정밀 선삭가공기의 Z축에서 발생하는 진직도 오차를 스트레이트 에지와 레이저 변위센

참고문헌

1. Jung, S.B. and Kim, S.W., "Improvement of Scanning Accuracy of PZT Piezoelectric Actuators by Feed-Forward Model Reference control," Precision Engineering, Vol. 16, No. 1, pp. 49-55, 1994.
2. P. Ge, M. Jouaneh, "Tracking Control of Piezoceramic Actuator," IEEE Trans. Control Systems Technology, Vol. 4, No. 3, pp.209-216, May, 1996.
3. 송제욱, 김승환, 송하성, 김호상, "압전 구동기를 이용한 미소절삭 공구대의 정밀위치제어" 한국정밀공학회지, 제14권, 제10호, pp. 50-57, 1997.
4. 김선호, 김동훈, "기상계측을 통한 가공형상 측정 시스템", 한국정밀공학회지, 제 18권 6호, pp9-18, 2001.