

광섬유레이저 엔코더 시스템을 이용한 초정밀 가공기의 나노미터급 가공 정밀도 향상

*김재열¹, 박이구², 박남수³, 윤성운⁴

¹ 조선대학교 메카트로닉스공학과, ²전주대학교 기계자동차공학과

³ 조선대학교 일반대학원 정밀기계공학과, ⁴ 조선대학교 기계공학과

Nano Accuracy Elevation of Ultra-Precision machining using Optical Fiber Laser Encoder System

*J. Y. Kim¹, L. K. Kwac², N.S. Kwak³, S. Y. Yun⁴

¹ Dept. of Mechatronics. Eng., Chosun Univ., ² Dept. of Mechanical and Automotive. Eng. JeonJU Univ.

³ Dept. of Precision Mechanical. Eng., Graduates School of Chosun Univ., ⁴ Dept. of Mechanical. Eng. Chosun Univ.

Key words : Ultra-Precision Cutting Unit(UPCU), piezoelectric actuator, Ultra-Precision- machining, Fiber Laser Encoder System , Processing Accuracy

1. 서론

최근 수요가 급증하고 있는 초정밀 제품은 반도체 칩퍼터, 항공우주, 영상정보, 정밀기계 산업 등 첨단산업 분야에 광범위하게 사용되고 있으며, 21세기 초에는 그 사용분야가 급속히 확대될 것으로 전망되므로 초정밀 가공기술은 국가적으로 시급히 확보해야 할 첨단기술 분야이다. 또한 요구되는 부품의 정밀도가 매우 높고 형상이 복잡하여 래핑이나 폴리싱만으로는 초정밀 가공이 불가능하게 됨에 따라 초정밀 가공기를 사용한 단결정 다이아몬드 공구에 의한 초정밀 가공 기술의 확보가 중요한 것이다. 또한 각종 정밀부품에서 요구되는 가공정밀도는 현재 최고 50nm에 이르고 있으며, 이와 같은 가공정밀도를 달성하기 위해서는 가공정밀도가 매우 높은 가공시스템의 성능 즉, 나노미터 수준의 높은 분해능과 전 구간에 걸쳐 높은 운동정밀도가 요구되고 있다. 구성요소가 고정밀도를 갖는다 하더라도 수 μm 에 달하는 이송계의 운동오차와 스피ن들의 회전오차 공작물의 열팽창 등에 의해서 가공정밀도에 한계를 가질 수 밖에 없다. 따라서 이러한 초정밀 나노급 가공에서는 일반가공과는 달리 나노 오더의 운동오차 성분과 환경오차 성분을 주의 깊게 고려해야 한다.

본 논문에서 이러한 오차를 유발하는 요소를 광섬유 레이저 엔코더 시스템으로 측정하고 보상함으로써 미소절삭 공구대(Ultra-Precision Cutting Unit)의 가공정밀도를 향상시키는 초정밀가공시스템을 제안하였다. UPCU는 스피ن들과 이송계의 운동오차를 정밀하게 측정하면서 압전액츄에이터(Piezoelectric actuator)를 이용하여 상대적으로 질량이 매우 작은 절삭공구와 툴홀더만을 미세하게 구동시켜 실시간으로 운동오차 보정하면서 가공할 수 있다. 또한 온도보상은 스피ن들과 이송계의 재질과 구조에 따라 변화되는 열변형을 실시간으로 보상된 위치값을 UPCU에 피드백 하였다.

2. 레이저 엔코더 시스템의 환경보상 오차측정

공기 굴절률 보상은 공기의 온도와 압력센서로부터 받아지는 정보에 따라 보상되어지며 공기 온도센서는 측정빔의 전달경로의 온도를 모니터링 하며, 기계의 경계내에서 내부 온도변화의 영향을 줄여준다. 재료의 열팽창 보상은 축 위치가 20°C(68°F)의 기준온도를 기본으로 온도변화에 따라 재료의 팽창계수를 적용하여 보상한다.

공기 굴절률, 온도, 습도 변화에 따른 레이저 엔코더의 환경오차는 레이저 컨트롤러에 보상알고리즘을 추가 하여 변위오차(Displacement error)를 보상하였다. 이 장의 환경오차 보상 실험은 레이저 엔코더의 안정된 영점을 확보와 안정된 레이저 주파수를 확보하기 위해 다음과 같은 4 가지 실험을 행하였다.

첫 번째 실험은 환경오차보상을 적용하지 않은 상태에서 레이저 엔코더를 세팅하고 변위는 주지 않고, 일정하게 온도변화를 주어 영점을 측정하였다.

두 번째 실험은 환경오차보상을 적용한 상태에서 변위는 주지 않고, 일정하게 온도변화를 주어 영점을 측정하였다.

세 번째 실험은 환경오차보상을 적용하지 않은 상태에서 레이저 엔코더를 세팅하고 변위는 주지 않고 영점을 측정하였다.

네 번째 실험은 환경오차보상을 적용한 상태에서 변위는 주지 않고 영점을 측정하였다. 첫 번째 실험에서는 Fig. 1와 같이 $\sim 23\text{nm}/^\circ\text{C}$ 의 오차를 확인할 수 있었으며,

두 번째 실험에서는 Fig. 1와 같이 $\sim 4\text{nm}/^\circ\text{C}$ 의 오차를 확인할 수 있었다. 세 번째 실험에서는 Fig. 2과 같이 $\pm 15.5\text{ppb}$ (peak to peak)의 주파수 응답을 확인할 수 있었으며,

네 번째 실험에서는 Fig. 2과 같이 $\pm 1.1\text{ppb}$ 의 주파수 응답을 확인할 수 있었다.

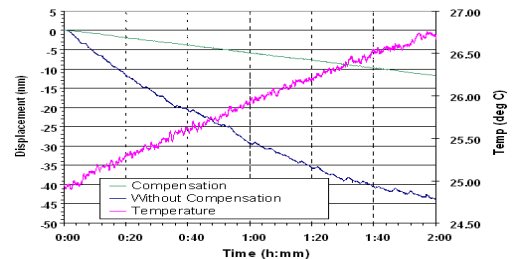


Fig. 1 Zero point Drift and temperature over time

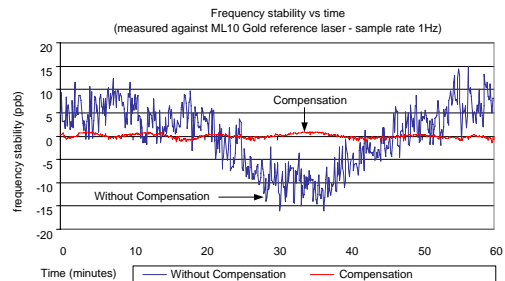


Fig. 2 Frequency stability

위의 결과에서 볼 수 있듯이 환경오차보상을 적용하지 않은 상태의 $23\text{nm}/^\circ\text{C}$ 의 영점 위치변화는 nm 오더의 초정밀 가공에서 치명적이라고 할 수 있으며, 목표한 가공정밀도(machining accuracy)를 구현하기에는 어려울 것으로 사료된다. 또한 주파수 응답측면에서 볼 때 측정된 위치정보의 신뢰도를 판단할 수 있는 요소라고 할 수 있으며 실험결과 환경오차보상이 없는 상태의 레이저 주파수는 신뢰수준이

다소 떨어지는 것으로 확인되었다. 또한 X 축 이송계의 진직도 오차를 1nm 분해능의 Laser Interferometer(ML: Rnshaw)를 이용하여 X 축을 일정한 속도로 움직이면서 가공센터를 기준으로 $\pm 100mm$ 를 측정하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 200mm 구간에 대해 약 $0.5\mu m$ 의 진직도 오차를 가지며, 이것은 UPCU의 제어알고리즘에서 절대위치에 대해 오차값을 계산하여 보정할 수 있다. 스핀들의 열팽창 측정을 위해 스핀들의 앞 쪽에 가공에 간섭을 주지 않는 범위에서 레이저 나노게이지 지그를 장착하여 스핀들을 가동하면서 측정하였다. 일반적으로 열팽창 오차는 저주파의 성분을 가지고 있기 때문에 스핀들의 형상오차의 고주파 성분을 저주파 필터를 통해 추출하였다. Fig. 4는 초정밀 절삭가공기의 스핀들이 가공 중에 발생하는 열팽창 오차를 측정된 결과를 나타낸 것이다.

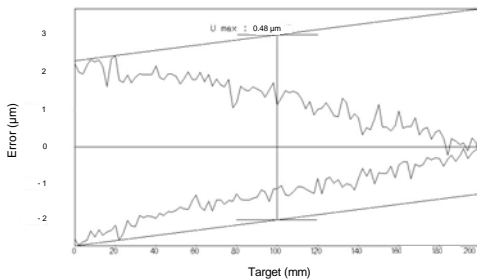


Fig. 3 The straightness error of X-axis slide

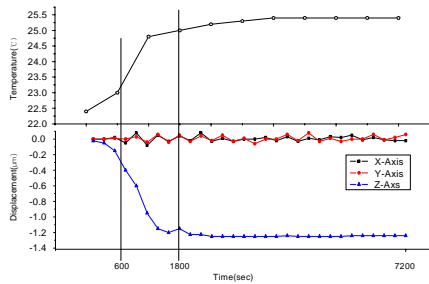


Fig. 4 The thermal growth error of spindle

3. UPCU의 초정밀위치결정 능력

UPCU의 초정밀위치결정 능력을 알아보기 위해 앞서 측정된 오차값을 적용하지 않고 두 가지 위치결정실험을 행하였다. 첫 번째 실험은 외부진동이 UPCU에 전달되지 않는 방진테이블위에서 직선 변위는 20nm 스텝을 계단형 펄스를 입력 하여 100nm 까지 이동 하도록 하고, 다시 20nm 스텝으로 0nm로 복귀하게 하였으며, 각 변위는 0.114 arcsec 스텝으로 0.57 arcsec를 이동하도록 하였다. 그 결과는 Fig. 5(a)와 같으며, 20nm 스텝과 0.114 arcsec 스텝의 미세구동이 문제없이 이루어지고 있는 것을 확인할 수 있었다. 또한 직선변위 미세구동에서 $\pm 5nm$, 각 변위 미세구동에서 0.114 arcsec의 위치결정능력을 보여주었다. 두 번째 실험은 UPCU를 가공기에 장착하여 위치결정 실험을 하였다. 미세구동 방법은 첫 번째 방법과 동일하게 하였다. 그 결과는 Fig. 5(b)와 같으며, 방진테이블에서 미세구동 하는 것 보다는 다소 성능이 떨어지기는 하지만 가공기의 스핀들이 3000RPM으로 회전하고 있는 중의 진동 피크 값이 약 800nm 이상에서도 20nm 이내로 제어가 되고 있다는 것을 감안하면, 가공 중 발생하는 X, Y, θ 방향의 운동오차는 본 논문에서 요구하는 성능을 만족하게 충분히 보상할

수 있다고 사료된다.

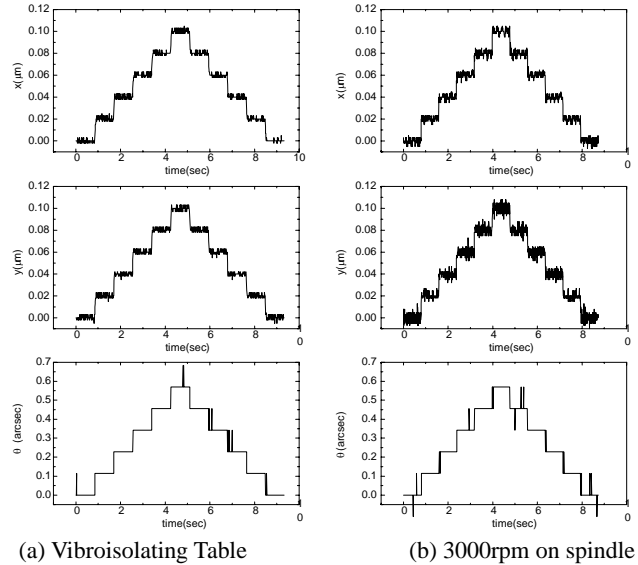


Fig. 5 20nm motion of UPCU

4. 결론

본 논문에서는 초정밀 절삭가공에서 나타나는 가공 오차의 주요 요인 x 축의 진직도 오차와 스핀들의 열팽창 오차성분을 가공중 실시간 측정하여 UPCU에 피드백 함으로써 가공정밀도를 향상시킬 수 있는 시스템을 제안하였다.

1. 환경보상이 없는 상태에서의 광섬유 레이저의 주파수 신뢰도를 다소 떨어지는 것으로 확인되었다.
2. 초정밀 가공시 발생하는 열팽창 오차 및 이송계의 운동 오차 등을 실시간으로 오차보상을 하여 약 50nm의 추종오차성능을 보여주었다.
3. UPCU의 미세구동 측면에서는 3000RPM으로 회전하고 있는 중의 진동 피크 값이 약 800nm 이상에서도 20nm 이내로 제어가 되고 있다는 것을 감안하면, 가공 중 발생하는 X, Y, θ 방향의 운동오차는 본 논문에서 요구하는 성능을 만족하게 충분히 보상할 수 있다고 사료된다.
4. 차후 초정밀가공실험을 통하여 UPCU의 정확한 가공정밀도 향상에 대한 정략적인 성능자료를 확보하는 연구를 수행할 것이다.

참고문헌

1. S.T,Smith. And D,G,Chetwynd., 1992, Foundation of Ultra precision mechanism design(Gordon and Breach Science Publishers)
2. H, Nakazawa, 1994, Principles of precision engineering
3. D, Keith Bowen, Development in nanotechnology, 1992
4. S. R. Patterson, E. B. Matgab: JSPE, 1985, 7(3), 123-128.
5. M. Shiraiishi and K. Uehara: Annal of The CIRP, 1979, 28, 333-337.
6. J. D. Kim: KSMTE, 1998, 7(6), 132-140.
7. Renishaw RLE 10 Manual. 2004.
8. L. K Kwac, J. Y Kim and Y. T Cho: Key Engineering Materials, 2004, 274-276, 343-348.
9. E. S. Lee, J. K. Lee and T. Suto: JSPE, 1988, 54(12), 81-86..