초정밀 FTS 시스템을 이용한 CNC Lathe 스피들 이송오차 보상 및 가공정밀도 향상

김재열[†] · 곽남수^{*}

조선대학교 메카트로닉스공학과

*조선대학교 첨단부품소재공학과

The Improvement of Machining Accuracy and Compensation of Feeding Error in CNC Lathe Using Ultra Precision Fast Tool

JaeYeol Kim[†] and Namsu Kwak^{*}

Dept. of Mechatronics Engineering, ChoSun University

**Dept. of Advanced components and materials Engineering, ChoSun University*

(Received September 28, 2010; Revised December 1, 2010; Accepted December 5, 2010)

Abstract – The ultra-precision products which recently experienced high in demands had included the large areas of most updated technologies, for example, the semiconductor, the computer, the aerospace, the media information, the precision machining. For early 21st century, it was expected that the ultra-precision technologies would be distributed more throughout the market and required securing more nation-wise advancements. Furthermore, there seemed to be increasing in demand of the single crystal diamond tool which was capable of the ultra-precision machining for parts requiring a high degree of complicated details which were more than just simple wrapping and policing. Moreover, the highest degree of precision is currently at 50 nm for some precision parts but not in all. The machining system and technology should be at very high performed level in order to accomplish this degree of the ultra-precision.

Keywords – ultra-precision fast tool servo(초정밀 FTS), piezo actuator(압전구동기), tracking error(추종오차), motion error(운동오차), ultra-precision positioning(초정밀위치결정), machining accuracy(가공정밀도)

1. 서 론

최근 수요가 급증하고 있는 초정밀 제품은 반도체 컴퓨터, 항공우주, 영상정보, 정밀기계 산업 등 첨단산업 분야에서 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 폴리싱 만으로는 초정밀 가공이 불가

능하게 됨에 따라 초정밀 가공기를 사용한 단결정 다이아몬드 공구에 의한 초정밀 가공 기술의 확보가 중요한 것이다. 그리고 각종 각종 정밀부품에서 요구되는 가공정밀도는 현재 최고 50 nm에 이르고 있으며, 이와 같이 가공정밀도를 달성하기 위해서는 가공정밀도가 매우 높은 가공시스템의 성능 즉, 나노미터 수준의 높은 분해능과 전 구간에 걸쳐 높은 운동 정밀도가 요구되고 있다.

구성요소가 고정밀도를 갖는다고 하더라도 수에 달하는 이송계의 운동오차와 스피들의 회전오차 공작물의 열팽창, 절삭조건 등에 의해서 가공정밀도에 한계를 가질 수 밖에 없다. 따라서 이러한 초정밀 가공에서 일반 가공과 달리 나노 오더의 운동오차 성분과 환경오차 성

[†]주저자 · 책임저자 : jykim@chosun.ac.kr

분을 주의 깊게 고려해야 한다. 본 논문에서는 이러한 오차를 유발하는 요소를 광섬유레이저 엔코더시스템을 이용하여 실시간으로 측정·보상하며 CNC Lathe 스핀들과 이송계의 운동오차를 정밀하게 측정하면서 압전 구동기(Piezo actuator)를 이용하여 초정밀 FTS (Ultra-Precision Fast Tool servo)의 초정밀위치결정을 통한 CNC Lathe의 가공정밀도를 향상 시키는 시스템을 제안하였다.

2. 초정밀 FTS 시스템 구성

2-1. 초정밀 나노스테이지

마이크로미터 이하의 반복정밀도를 요구하는 기계요소의 미세구동에서는 슬라이딩이나 구름방식으로 구동되는 방식은 마찰에 의한 스틱 슬립이나 백래쉬 등의 문제가 발생하여 요구하는 반복정밀도를 얻기 힘들다. 마찰이나 환경변화 등에 기인한 온도 변화나 온도구배는 나노스테이지의 구동 정밀도에 좋은 않은 영향을 준다. 따라서 온도의 영향을 적게 받으면서 상대운동을 할 때 마찰 없이 운동을 구현할 수 있는 기계요소가 요구된다. 탄성 힌지형 나노스테이지는 서로 마찰하는 부분이 없어 강한 전단력이 발생하지 않는다면 일정한 운동궤적을 가지고 경계면에서의 마도가 없어 시스템의 불안정성을 줄여 줄 수 있다. 그리고 변형이 부드럽고 연속적이며 온도구배나 온도변화에 영향을 적게 받는 기구를 만들 수 있으며 변위가 정확하게 예측할 수 있으며 매우 선형적인 힘-변위 관계를 얻을 수 있다. 또한 탄성-취성 재질을 이용할 경우 매우 높은 반복정밀도를 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다. Fig. 1은 본 논문에서 사용된 탄성 힌지형 나노스테이지를 나타내고 있다.

Fig. 1. Flexure hinge type nano stage.

Table 1. Material properties of micro stage

Equipment	Performance	Reference
Piezoelectrics actuator	Max. stroke 40~50 μm	PI-300
PZT controller	3-Axis controller	PI-Posi 150-3-A
Displacement sensor	Resolution : 10 nm	Renishaw RLE10
A/D, D/A Board	D/A, A/D 32channel	Dspace DSP board
Environment compensator	Resolution : 10 nm to 5 nm	Renishaw RCU10

Fig. 2. Composition of ultra precision fast tool servo system.

2-2. 초정밀 FTS 시스템

다음 Table 1은 본 논문에서 사용된 초정밀위치결정용 실험장치의 구성을 나타내었으며 Fig. 2는 초정밀 FTS 전체 시스템의 구성도를 나타내고 있다.

메인 컴퓨터의 제어에 필요한 A/D, D/A보드(DSP 1103)은 다양한 디지털 신호 및 아날로그 신호의 입출력을 연산하는 중추적인 기능을 하며, D/A 변환 시 컴퓨터 내의 제어 알고리즘을 통하여 보상된 디지털 제어신호를 아날로그 신호로 변환시킨 뒤 고전압 증폭기로 보낸다. 고전압 증폭기는 아날로그 신호를 증폭시켜서 압전구동기를 구동시키고, 압전구동기의 운동은 탄성힌지를 축방향으로 변위가 발생된다. 이때의 변화된 변위에 비례하여 광섬유 레이저 엔코더가 위치신호를 검출하고 그 위치 신호를 디지털로 변환시켜 컴퓨터에 입력시켜 피드백할 수 있는 제어신호를 발생하도록 구성되어 있다.

제어에 사용된 프로그램은 Matlab/Simulink과 연동하여 사용할 수 있는 ControlDesk(Dspace)를 사용하였다. Fig. 3은 실험을 위해 구성된 초정밀 FTS 시스템의 구성사진을 나타내고 있다.

Fig. 3. Photograph of ultra-precision fast tool servo system.

3. 초정밀 나노스테이지의 추종오차 실험

가공실험에 앞서 초정밀 나노스테이지의 오차추종 성능을 알아보기 위해 이미 측정된 X축의 진폭 오차와 스피들의 열팽창 오차를 입력하여 초정밀 나노스테이지가 추종하도록 하는 실험을 수행하였다.

(a) Displacement

(b) Error

Fig. 4. The tracking error of ultra-precision FTS (3 μm).

(a) Displacement

(b) Error

Fig. 5. The tracking error of ultra-precision FTS (1.5 μm).

제어기는 dSpace사의 DSP 보드(ds1103)를 사용하였으며, PID제어 알고리즘이 적용되었다. 실험에 사용된 초정밀 가공기의 종합적인 오차성분은 1.5 μm 이내에서 저주파 성분을 가지고 있었다. 따라서 초정밀 나노스테이지의 오차보상성능을 알아보기 위해서 1.5 μm, 3 μm의 진폭과 1 Hz의 주기를 갖는 정현파 입력응답 실험을 통해 제어기를 설정한 후 이에 대한 단위입력 응답실험을 수행하였다.

Figs. 4-5는 실험을 통해 얻어진 결과를 보여주고 있으며, 약 30 nm의 추종오차를 보여주었으며, 만족할 만한 오차보상을 하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 실제가공실험에서도 목표로 하는 가공정밀도를 구현하는데 문제가 없을 것으로 사료된다.

4. 초정밀 위치결정 실험

초정밀 나노스테이지의 초정밀위치결정 능력을 알아

Fig. 6. 20 nm motion of ultra-precision FTS.

보기 위해 앞서 측정된 오차값을 적용하지 않고 두 가지 위치결정실험을 행하였다. 첫 번째 실험은 외부진동이 초정밀 나노스테이지에 전달되지 않는 방진테이블 위에서 직선 변위는 20 nm 스텝을 계단형 펄스를 입력 하여 100 nm까지 이동 하도록 하고, 다시 20 nm 스텝으로 0 nm로 복귀하게 하였으며, 각 변위는 0.114 arcsec 스텝으로 0.57 arcsec를 이동하도록 하였다. 그 결과는 Fig. 6(a)과 같으며, 20 nm 스텝과 0.114 arcsec 스텝의 미세 구동이 문제없이 이루어지고 있는 것을 확인할 수 있었다. 또한 직선변위 미세구동에서 ± 5 nm, 각 변위 미세구동에서 0.114 arcsec의 위치결정능력을 보여주었다.

두 번째 실험은 초정밀 나노스테이지를 가공기에 장착하여 위치결정 실험을 하였다. 미세구동 방법은 첫 번째 방법과 동일하게 하였다. 그 결과는 Fig. 6(b)와 같으며, 방진테이블에서 미세구동 하는 것 보다는 다소 성능이 떨어지기는 하지만 가공기의 스핀들이

3000 RPM으로 회전하고 있는 중의 진동 피크 값이 약 800 nm 이상에서도 20 nm 이내로 제어가 되고 있다는 것을 감안하면, 가공 중 발생하는 X, Y, θ 방향의 운동오차는 본 논문에서 요구하는 성능을 만족하게 충분히 보상할 수 있다고 사료된다.

5. 초정밀 가공 및 표면형상 분석

가공실험을 수행하기 위해 초정밀 나노스테이지를 CNC선반의 공구대에 장착하여 이송오차보상 시스템을 연동할 때와 연동하지 않을 때 가공실험을 진행하였다. 가공정밀도를 평가하기 위한 방법으로 초정밀 3차원 형상측정기(SIS-1000)를 이용하여 표면거칠기 및 초정밀 형상측정 실험을 수행하였다.

실험 방법은 다음과 같다. 가공시편은 단결정 다이아몬드 의 연성모드 가공에 용이하게 적용할 수 있는

Table 2. Optimal condition of machining

Material	SKD61	Brass
Spindle velocity	2000V[m/min]	1000[m/min]
Feeding rates	0.05f[mm]	0.05f[mm]
Increment Cross Feed Grinding	0.3d[mm]	0.1d[mm]

(a) Surface of Before Processing

(b) After Processing(Not applicable)

(c) After Processing(Applied to the system)

Fig. 7. Surface morphology of SKD61.

(a) Surface of Before Processing

(b) After Processing(Not applicable)

(c) After Processing(Applied to the system)

Fig. 8. Surface morphology of free cutting brass.

템퍼링 처리된 SKD61, 와 가공성이 용이한 일반패삭 황동(Free Cutting Brass)를 사용하였다.

Table 2은 각 가공시편의 최적 가공조건을 나타내고 있다.

시스템을 연동 여부에 따라 가공한 가공시편의 가공

Table 3. Surface roughness of materials specimens

No.	Materials	Measu.Range (Pixel)	Ra(μm)
1	SKD61	400×300	2.2801
2	SKD61	400×300	0.8447
3	SKD61	400×300	0.2720
4	Free Cutting Brass	400×300	1.5131
5	Free Cutting Brass	400×300	0.8790
6	Free Cutting Brass	400×300	0.1642

면의 표면거칠기를 측정하기 위해 다음과 같은 방법을 수행하였다.

조정밀 3차원 형상측정 시 10X, 20X 50X를 사용하여 최적의 미세형상을 측정하여 가장 적합한 배율을 확인하였다. 이 실험과정을 통해 10X의 배율을 가진 렌즈를 사용하였을 때 가공면 미세형상 측정 및 표면 거칠기를 평가하는데 신뢰도가 더욱 높음을 확인하였다. 그리고, 조정밀 3차원 형상측정기는 가공면을 측정할 수 있는 최대 면적이 300 pixel×400 pixel이므로 가공면의 중심부에 가공면의 끝단까지의 각 5 Section을 설정하여 수평방향으로 5Line을 측정하였다.

가공시편은 각 3개로 총 6개 시편을 이용하여 표면 형상 및 표면거칠기 측정을 수행하였으며, 가공시편은 초기의 표면상태를 확인하기 위해 최종적으로 제작된 시편의 표면형상 및 표면거칠기를 측정하였다. 또한 시스템에서 발생하는 운동오차를 보정 전 후의 표면형상 및 표면거칠기를 측정하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 조정밀 절삭가공에서 나타나는 가공 오차의 주요 요인 x축의 진폭도 오차성분을 가공중 실시간 측정하여 UPCU에 피드백 함으로써 가공정밀도를 향상시킬 수 있는 시스템을 제안하였다. 차후 조정밀 가공기의 가공실험을 통하여 가공정밀도 향상에 정량적인 성능 자료를 확보하는 연구는 수행할 것이다.

1. 20 nm 스텝과 0.114 arcsec 스텝의 미세구동이 문제없이 이루어지고 있는 것을 확인할 수 있었다. 또

한 직선변위 미세구동에서 ± 5 nm, 각 변 위미세구동에서 0.114 aecsec의 위치결정능력을 보여 주었다.

2. UPCU의 미세구동 측면에서는 3000 RPM으로 회전하고 있는 중의 진동 피크 값이 약 800 nm 이상에서도 20 nm 이내로 제어가 되고 있다는 것을 감안하면, 가공 중 발생하는 X, Y, θ 방향의 운동오차는 본 논문에서 요구하는 성능을 만족하게 충분히 보상할 수 있다고 사료된다.

3. 조정밀 가공실험을 통하여 각 가공시편의 표면 형상 및 표면거칠기를 측정한 결과, SKD61의 경우 조정밀 가공이 이루어지지 않은 가공면의 Ra값은 2.2801 μm 이며 오차보상 전 후의 표면 거칠기 Ra값은 각각 0.8447 μm , 0.2720 μm 이다. Brass 의 경우 초기 가공면의 Ra값은 1.5131 μm 이며 오차보상 전 후의 Ra값은 각각 0.8790 μm , 0.1642 μm 로 확인되었다. 따라서 표면형상 및 표면 거칠기의 향상으로 인하여 가공정밀도 향상이 이루어졌음을 확인할 수 있었다

후 기

본 연구는 2010년 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지역혁신인력양성사업의 연구결과임(IOO151).

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 and E. B. Matgab, *JSPE*, Vol. 7, No. 3, pp. 123-128, 1985.
5. M. Shiraishi and K. Uehara, *Annal of The CIRP*, Vol. 28, pp. 333-337, 1979.
6. J. D. Kim, *KSMTE*, Vol. 7, No. 6, pp. 132-140, 1998.
7. Renishaw RLE 10 Manual. 2004.
8. L. K Kwac, J. Y Kim, and Y. T Cho: *Key Engineering Materials*, Vol. 274-276, pp. 343-348, 2004.
9. E. S. Lee, J. K. Lee, and T. Suto, *JSPE*, Vol. 54, No. 12, pp. 81-86, 1988.