

# 초정밀 가공기의 실시간 운동오차 및 열변형오차 보상

곽이구<sup>+</sup>, 김재열\*, 김홍건<sup>+</sup>  
(논문접수일 2006. 2. 20, 심사완료일 2006. 5. 26)

## Real-time Motion Error Time and the Thermal Error Compensation of Ultra Precision Lathe

Lee-Ku Kwac<sup>+</sup>, Jae-Yeol Kim\*, Hong-Gun Kim<sup>+</sup>

### Abstract

Recently, demand the ultra precision product which is increasing rapidly is used extensively frontier industry field such as semi-conductor, computer, aerospace, precision machine. Ultra precision processing is the portion that is very needed to NT in the field of mechanical engineering. The latest date, together with radical advancement of electronic and photonics industry, necessity of ultra precision processing is on the increase for the manufacture of various kernel parts those are connected with these industrial fields. Specially, require motion accuracy of high resolution of nm order in stroke of hundreds millimeters according as diameter of processing object great and processing accuracy rises. In this case, the response speed absolute delay because inertial mass of moving part is very large. Therefore, real time motion error compensation becomes very hardly. In this paper, we used ultra precision cutting unit(UPCU) to cope such problem. a UPCU is designed and tested to obtain sub-micrometer from accuracy in diamond turning of flat surfaces. The thermal growth spindle error is compensated for real time using a UPCU driven by piezoelectric actuator along with a laser encoder displacement sensor.

**Key Words** : Error compensation(오차 보상), Ultra precision lath(초정밀 선반), PZT(압전소자), Laser encoder(레이저 엔코더), ultra precision cutting unit(UPCU)(미소절삭유닛), Flexure hinge(탄성심지), The thermal growth error(열팽창 오차)

## 1. 서론

최근 초정밀 절삭 가공기에 요구되고 있는 공작물의 가공

직경이 커지고 있으며, 동시에 가공정밀도가 높아지는 추세이다. 그리고 슬라이드의 행정거리는 수백 mm로 길어지면 서 상대적으로 나노미터 수준의 높은 분해능과 전 구간에

+ 전주대학교 기계자동차공학과

\* 교신저자, 조선대학교 메카트로닉스공학과 (jykim@chosun.ac.kr)  
주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375

결쳐 높은 운동정밀도가 요구되고 있다<sup>(1)</sup>. 구성요소가 고정밀도를 갖는다 하더라도 수  $\mu\text{m}$ 에 달하는 이송계의 운동오차와 스피ndl의 회전오차, 공작물의 열팽창 등에 의해 가공정밀도에 한계를 가질 수밖에 없다<sup>(2)</sup>.

따라서 이러한 초정밀 나노급 가공에서는 일반가공과는 달리 나노미터의 운동오차 성분과 환경오차 성분을 주의 깊게 고려하여야 한다.

본 논문에서는 이러한 오차를 유발하는 요소를 실시간으로 측정하고 미소절삭 공구대(Ultra\_Precision Cutting Unit 이하 UPCU)를 통해 보상함으로써 가공정밀도를 향상시키는 초정밀오차보상시스템을 제안하였다. UPCU는 스피ndl과 이송계의 운동정밀도를 정밀하게 측정하면서 압전 액츄에이터(piezo electric actuator)를 이용하여 상대적으로 질량이 매우 작은 절삭공구와 툴홀더만을 미세하게 구동시켜 실시간으로 운동오차를 보정하면서 가공할 수 있다. 또한 온도보상은 스피ndl과 이송계의 재질과 구조에 따라 변화되는 열변형을 실시간으로 보상된 위치 값을 UPCU에 피드백하였다.

## 2.시스템 구성 및 오차측정

본 논문에서 사용된 초정밀 가공기는 화천기공에서 제작된 UP-2를 사용 하였으며, 분해능 0.1 $\mu\text{m}$ , 반복정밀도 2 $\mu\text{m}$ 의 성능을 가지고 있다. Fig. 1에서와 같이 UP-2는 각 축이 독립형으로 이루어져 있으며, 이송중 슬라이드 간의 간섭을 최소화된 것이다.

일반적으로 초정밀 나노가공(nm-Ultra-Precision Cutting)에서 가공정밀도에 크게 영향을 미치는 요소는 스피ndl의 회전에 의한 운동오차와 가공물의 형상에 직접적인 영향을 미치는 X축 이송계의 진직도, 온도변화에 의한 스피ndl과 이송계의 열팽창 등이 있다.

위와 같은 오차성분을 보상하기 오차보상 위해 시스템은 10nm 분해능의 레이저 엔코더에 의해 X축 이송계의 진직도와 스피ndl 회전에 의한 상대 오차를 실시간 측정하며, 측

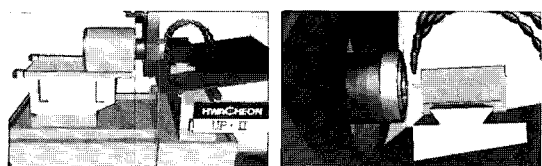


Fig. 1 The Structure of UP-2

정된 오차는 다시 온도변화와 재질의 열 팽창계수, 구조 등에 따라 실시간 보정되어 UPCU에 피드백 함으로써 오차를 보상한다. 시스템 구성은 Fig. 2와 같다.

Fig. 3은 X축 이송계의 진직도 오차를 1nm 분해능의 레이저 인터페로메터(ML10 ; Rnshaw)를 이용하여 X축을 일정한 속도로 움직이면서 가공센터를 기준으로  $\pm 100\text{mm}$ 를 왕복 측정한 것이다. 그래프에서 보는바와 같이 200mm 구간에 대해 약 0.48 $\mu\text{m}$ 의 진직도 오차를 가지며, 이것은 UPCU의 제어 알고리즘에서 절대위치에 대해 오차 값을 계산하여 보상할 수 있다.

스피ndl의 열팽창 측정을 위해 스피ndl의 앞 쪽에 가공에 간섭을 주지 않는 범위에서 레이저 나노게이지(OPTRA Nanogage100)를 지그를 장착하여 스피ndl을 회전시키면서 측정하였다. 일반적으로 열팽창 오차는 저주파의 성분을 가지고 있기 때문에 스피ndl의 형상오차의 고주파 성분을 저주파 필터를 통해 추출하였다. Fig. 4는 초정밀절삭가공기의 스피ndl이 가공중에 발생하는 열팽창 오차를 측정된 결과를 나타낸 것이다.

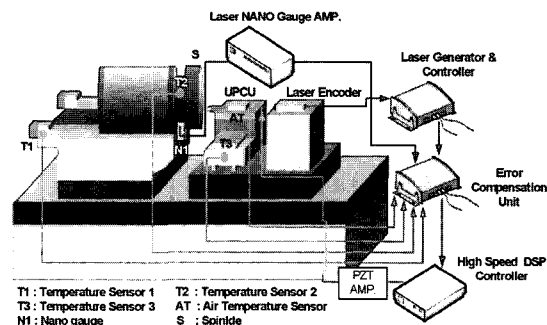


Fig. 2 Block Diagram of Error Compensation System

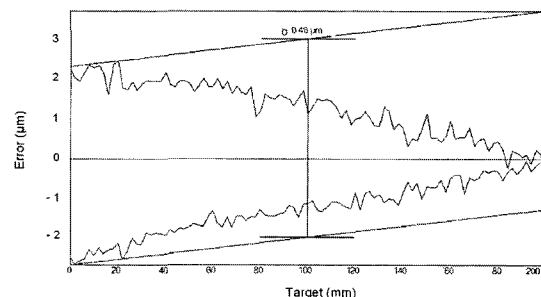


Fig. 3 The Straightness error of X-axis Slide

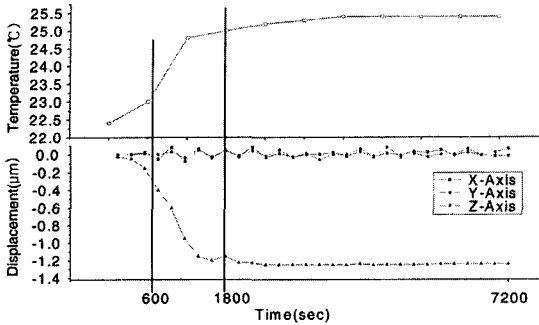


Fig. 4 The thermal growth error of spindle

### 3. UPCU의 구동특성

굽힘(bending)을 이용한 탄성변형은 형태가 간단하고 동작이 편리하며, 마찰이나 백래쉬가 없고, 응답속도가 비교적 빠르다는 장점이 있기 때문에 미세구동장치에 많이 응용되고 있다<sup>(3)</sup>. 가장 일반적인 굽힘체는 Fig. 5 (a)와 같은 단축 굽힘체로 어느 한방향의 입력에 대해서만 유연하고, 나머지 방향에 입력에 대해서는 견고한 성질을 가지고 있다. 따라서 원하는 방향의 운동만 발생시켜주고 나머지 방향에 대해서는 운동을 유발하지 않아 운동의 간섭을 줄일 수 있다. 이를 3축으로 운동하는 UPCU에 적용하기 위해서는 x, y 방향의 병진운동과  $\theta$  방향의 회전운동을 동시에 수행할 수 있는 구조로 바뀌어야 하며, 이런 개념으로 수정된 굽힘체의 기본 구조는 Fig. 5 (b)와 같다. Fig. 6은 Fig. 5 (a)의 굽힘체를 응용해서 설계된 UPCU의 마이크로 스테이지 구조를 보여주고 있으며, 압전구동기와 일체형 탄성굽힘체로 구성되어 있다.

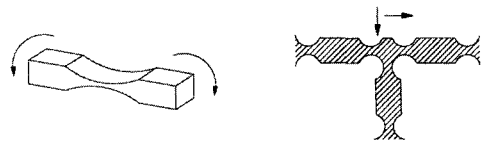
UPCU는 인가전압에 대한 압전구동기의 변위에 의하여 탄성굽힘체들이 변형함으로써 톨 홀더에 상대적인 변위가 유발된다. 이때 톨 홀더의 대변위는 각 압전구동기의 배열과 그 지점에서의 변위량으로 간단하게 구할 수 있으며, 기하학적인 모델을 Fig. 7에 나타내었다.

우선 압전구동기에 가한 전압입력과 그에 대한 압전구동기의 출력변위의 관계를 규명하는 것이 필요하며, 벡터  $U_p$ ,  $M_{U_p}$ 를 다음과 같이 정의 한다.

$$U_p = [u_{p1} \ u_{p2} \ u_{p3}]^T \quad (1)$$

$$M_{U_p} = [x_p \ y_p \ \theta]^T \quad (2)$$

이때  $u_{pi}$ ,  $M_{pi}$ 는 각각 i번째의 입력전압과 압전구동기의



(a) Single-axis flexure (b) Modified flexure structure  
Fig. 5 Basic flexure structure and its application for 3-axis fine motion mechanism

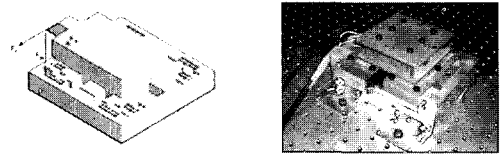


Fig. 6 Flexure structure and Photograph of UPCU

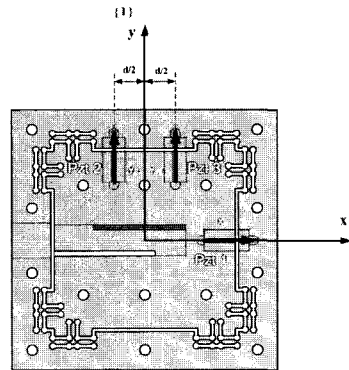


Fig. 7 Kinematic model of the UPCU

출력변위를 나타낸다. 일반적으로 입력전압  $U_p$ 와 압전구동기 출력변위  $M_{U_p}$ 는 동적(dynamically)으로 결합(couple)되어 상호 영향을 주게 되며, 그 관계는 다음과 같이 기술될 수 있다.

$$M_{U_p}(s) = A(s)U_p(s)$$

$$M_{p,i}(s) = \sum_{j=1}^3 a_{ij}(s)u_{pj}(s) \quad (i=1,2,3) \quad (3)$$

이때  $a_{ij}(s)$ 는 j번째 압전구동기에 인가한 전압과 i번째 압전구동기의 출력변위를 연결시켜주는 계수로 다음과 같이 표현된다.

$$a_{ij}(s) = b_{ij}g_{ij}(s) \quad (4)$$

$b_{ij}$ 는 인가전압에 대한 압전구동기 변위의 정적이득을 나타내고  $g_{ij}(s)$ 는 동특성을 나타낸다. 또한 압전구동기의 변위  $(x_p, y_{p1}, y_{p2})$ 와 톨 홀더의 상대변위의 관계는 기하학적으로 다음과 같이 기술될 수 있다.

$$M \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{1}{d} & \frac{1}{d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_{p1} \\ y_{p2} \end{bmatrix}$$

$$M P_O = {}^M J P_P \quad (5)$$

식 (3)과 식 (4), 식 (5)로부터 입력전압과 톨홀더의 상대변위와의 관계는 다음과 같이 정의 된다.

$$M P_O(s) = {}^M J A(s) U_p(s) = {}^M J B G(s) U_p(s) \quad (6)$$

#### 4. UPCU의 초정밀위치결정 능력

본 논문에서 사용된 PZT의 최대 변위량은  $50\mu\text{m}$ 이며, 고유주파수는  $20\text{kHz}$  이다. UPCU의 행정거리(추종거리)와 동적 추종 주파수는 PZT의 능력에 의존한다. 하지만 예압과 힌지의 탄성 및 안전성을 고려하여 UPCU의 최대 행정거리는  $5\mu\text{m}$ 영역에서, 추종주파수는  $5\text{kHz}$  내에서만 구동된다. 또한 UPCU의 초정밀위치결정 능력을 알아보기 위해 앞서 측정된 오차값을 적용하지 않고 두 가지 위치결정실험을 행하였다.

첫 번째 실험은 외부진동이 UPCU에 전달되지 않는 방진

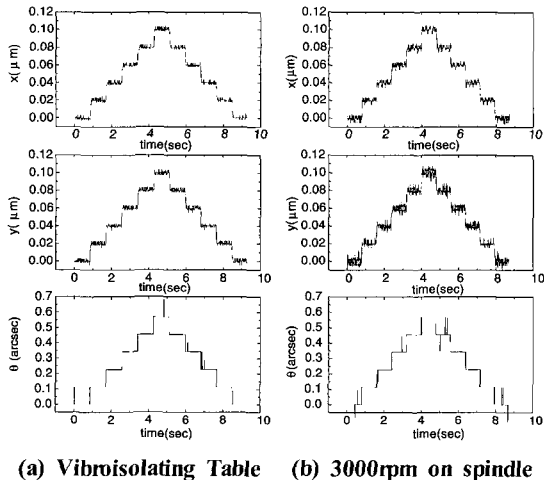


Fig. 8 20nm Motion of UPCU

레이블위에서 직선 변위는  $20\text{nm}$  스텝을 계단형 펄스를 입력 하여  $100\text{nm}$  까지 이동 하도록 하고, 다시  $20\text{nm}$  스텝으로  $0\text{nm}$ 로 복귀하게 하였으며, 각 변위는  $0.114 \text{ arcsec}$  스텝으로  $0.57 \text{ arcsec}$ 를 이동하도록 하였다. 그 결과는 Fig. 8과 같으며,  $20\text{nm}$  스텝과  $0.114 \text{ arcsec}$  스텝의 미세구동이 문제없이 이루어지고 있는 것을 확인할 수 있었다. 또한 직선변위 미세구동에서  $\pm 5\text{nm}$ , 각 변위 미세구동에서  $0.114 \text{ arcsec}$ 의 위치결정능력을 보여주었다.

두 번째 실험은 UPCU를 가공기에 장착하여 위치결정 실험을 하였다. 미세구동 방법은 첫 번째 방법과 동일하게 하였다. 그 결과는 Fig. 8과 같으며, 방진테이블에서 미세구동하는 것 보다는 다소 성능이 떨어지기는 하지만 가공기의 스핀들이  $3000\text{RPM}$ 으로 회전하고 있는 중의 진동 피크 값이 약  $800\text{nm}$  이상에서도  $20\text{nm}$  이내로 제어가 되고 있다는 것을 감안하면, 가공 중 발생하는 X, Y,  $\theta$  방향의 운동오차는 본 논문에서 요구하는 성능을 만족하게 충분히 보상할 수 있다고 사료된다.

#### 5. UPCU의 오차추종 성능실험

가공실험에 앞서 UPCU의 오차추종 성능을 알아보기 위

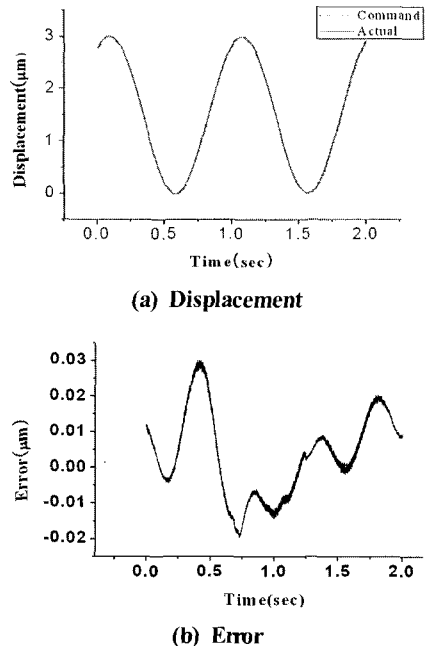


Fig. 9 Tracking error of UPCU( $3\mu\text{m}$ )

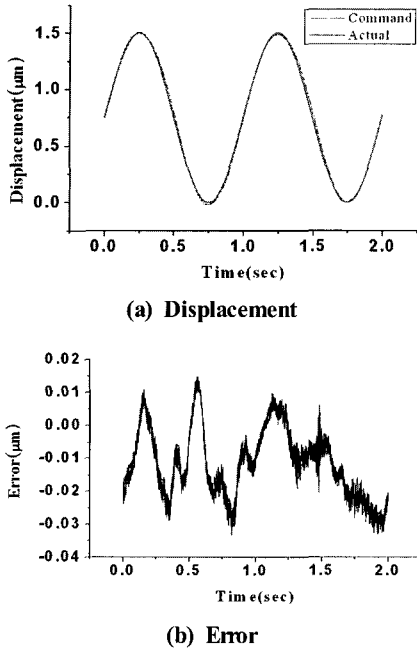


Fig. 10 Tracking error of UPCU(1.5µm)

해 이미 측정된 X축의 진직도 오차와 스피들의 열팽창 오차를 입력하여 UPCU가 추종하도록 하는 실험을 수행하였다. 제어기는 dSpace사의 DSP 보드(ds1103)를 사용하였으며, PID제어 알고리즘이 적용되었다. 실험에 사용된 초정밀 가공기의 종합적인 오차성분은 1.5µm 이내에서 저주파 성분을 가지고 있었다. 따라서 UPCU의 오차보상성능을 알아보기 위해서 1.5µm, 3µm의 진폭과 1Hz의 주기를 갖는 정현파 입력 응답 실험을 통해 제어기를 설정한 후 이에 대한 단위입력 응답실험을 수행하였다.

Fig. 9와 10은 실험을 통해 얻어진 결과를 보여주고 있으며, 약 50nm의 추종오차를 보여주었으며, 만족할만한 오차 보상을 하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 실제가공실험에서도 목표로 하는 가공정밀도를 구현하는데 문제가 없을 것으로 사료된다.

## 6. 결론

본 논문에서는 초정밀 절삭가공에서 나타나는 가공오차의 주요 요인 x축의 진직도 오차와 스피들의 열팽창 오차성분을 가공중 실시간 측정하여 UPCU에 피드백 함으로써 가공정밀도를 향상시킬 수 있는 시스템을 제안하였다.

그 결과 실시간 오차보상을 하여 약 50nm의 추종오차성능을 보여주었다. 이것은 차후 초정밀가공에서 목표 가공정밀도를 달성하는데 문제가 없을 것으로 사료된다.

차후 초정밀가공실험을 통하여 UPCU의 정확한 가공정밀도 향상에 대한 성능을 확인하여야 하며, 여러가지 외란에 의한 오차 성분을 파악하여 보상하여야 할 것이다.

## 후기

“본 논문은 2004년도 조선대학교 연구조성비(연구조교) 지원으로 연구되었음”.

## 참고 문헌

- (1) Kwac, L. K., Kim, J. Y. and Cho, Y. T., 2004, “FE Analysis According to Hinge Condition of Micro Stage for Micro Cutting Machine,” *Key Engineering Materials*, Vols. 274-276, pp. 343~348.
- (2) Kim, H. S. and Kim, E. J., 2003, “Feed-forward control of fast tool servo for real-time correction of spindle error in diamond turning of flat surfaces,” *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, pp. 1177~1183.
- (3) Smith, S. T. and Chetwynd, D. G., 1992, *Foundation of Ultra Precision Mechanism Design*, Gordon and Breach Science Publishers.
- (4) Bowen, D. K., 1992, *Development in Nano-technology*, Gordon and Breach Science Publishers.
- (5) Nakazawa, H., 1994, *Principles of Precision Engineering*, Gordon and Breach Science Publishers.