한국공작기계학회 2003 춘계학술대회 논문집 pp.173~178

나노부품 초정밀가공기용 마이크로스테이지의 절삭력 예측모델 시뮬레이션

김재열*, 심재기+, 곽이구++, 안재신++, 한재호+++, 노기웅++++

The Simulation of Cutting Force Estimate Model at Micro-Stage for Ultra Precision Cutting Machine of Nano Part

Jea-Yoel Kim*, Jea-Gi Sim+, Lee-Ku Kwac++, Jea-Sin An++, Jea-Ho Han+++, Ki-Woong Roh++++

Abstract

Recently, according to the development of mechatronics industry that was composed of NT, ST, IT, RT and etc, the necessity of nano-parts was increased. Because of the necessity, this research was started for improving work precision of the parts as fixing UPCU (Ultra Precision Cutting Unit) on lathe.

So, in this research, we executed the modeling of UPCU (Ultra Precision Cutting Unit) by the application of PZT, the relationship between the displacement of tool in UPCU and the cutting force of it has been in take a triangular position in the case of plane cutting. The modeling of system, that is containing the fine displacement, was performed. Also, we would like to find the optimal cutting condition through the simulation of relationship between the displacement and the cutting force.

Key Words : 미소절삭유닛 (UPCU ; Ultra Precision Cutting Unit), 절삭력 (Cutting Force), PZT, Modeling, Simulation

1. 서 론

최근 NT, ST, IT, RT, 메카트로닉스 산업 등의 발달로 인해 초정밀나노가공부품의 필요성과 중요성이 확대되고 있다. 이러한 초정밀나노가공을 위해 서브마이크로미터의 안정적인 절삭깊이의 유지가 공작기계의 중요한 성능으로 요구되고 있다. 하지만 대부분의 공작기계가 설계제작시 여러 가지의 변수들에 의하여 초기 설계목표에 못 미치는 성능(가공정밀도)을 가지게 된다. 따라서 최적의 가공정밀도를 구현하기 위해서는 이러한 문제를 보상할 수 있는 시스템이 필요하다. 공작기계를 사용할 때 발생하는 가공오차는 일반적으로 치수오차, 형상오차, 표면거칠기 등으로 나타난다.[1]

그 원인으로는 공작기계 자체의 기하오차, 운동기구에 의한 오차, 가공프레스에서 생기는 절삭력 및 열에 의한 오차, 그리고 환경 등이 있으며 공작기계 공작물, 공구에 작용하고, 최종적으로 제작되는 공작물의 품질을 손상시킨다. 특히 공작기계의 테이블 이송오차는 가공하고자하는 피삭재의 형상에 결정적인 영향을 미치게 된다.
테이블의 이송오차는 테이블의 위치결정분해능과 절삭력

* 주저자, 조선대학교 기전공학과 (jykim@chosun.ac.kr)
주소: 539-710 광주시 동구 서석동 375
+ 조선대학교 기전공학과
++ 조선대학교 대학원 정밀기계공학과
+++ 송원대학 자동차과
++++ 화천기공

과의 상관관계를 이루며, 주축의 회전특성 및 진동에 의하여 그 성능을 저하시킨다. 이러한 공작기계 고유의 테이블 이송오차는 가공조건의 변화로는 개선이 어려우며, 따라서 이송제어를 이용하여 오차 보정 및 제어하는 대책이 필요하게 된다. 또한 이송제어는 크게 공작기계 자체 이송을 이용하는 방법과 외부의 능동적인 미세 이송장치를 이용하는 방법으로 구분 할 수 있다.[2]

He-Ne 레이저 인프레스 계측시스템을 이용하여 선삭가공에서 공작물의 직경을 측정하면서 수치제어 컨트롤러에서 보정된 펄스 신호를 내보내어 공작기계 자체 테이블의 이송을 이용하여 직경변화의 오차를 보정하거나[3], 공구의 열변위 모델을 이용하여 공구의 변위를 조정함으로써 선삭시의 직경오차를 보정한 예가 있다.[4] 그러나 공작기계의 자체의 이송으로 보정법은 나노가공의 구현까지는 한계가 있다.

따라서 본 논문에서는 압전소자를 이용하여 미세절삭유닛(UPCU ; Ultra Precision Cutting Unit)을 모델링하고, 초정밀 평면가공시의 UPCU의 공구의 변위와 절삭력의 관계를 정립함으로 미세변위를 유지하는 시스템을 모델링하였다. 또한 변위와 절삭력의 관계를 시뮬레이션 함으로서 UPCU의 최적의 절삭조건을 찾고자 하였다.

2. 미세절삭유닛 모델링 및 절삭력 모델링

시스템을 구성하기 앞서 장치에 대한 모델링을 하여야 하며, 또한 가공물을 절삭하기 위한 시스템이기 때문에 툴과 가공물간의 절삭력이 중요한 제어 요소가 된다.

절삭력을 모델링하기 위해서는 먼저 초정밀 미세 절삭장치에 대한 모델링을 하여야 하며, 다음 이것을 토대로 절삭력을 모델링한다.

초정밀 미소절삭 장치를 수치제어 선반에 장착하여 가공되는 가공물의 가공 에러를 보정하는 초정밀 미소절삭 장치의 개략도를 보면 Fig.1과 같다.

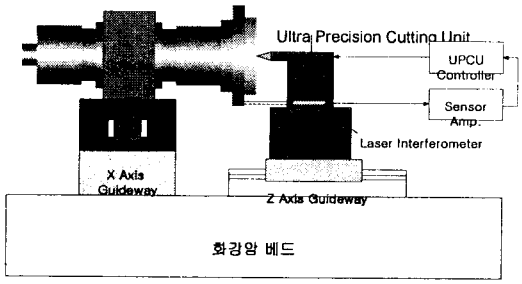


Fig.1 Schematic Diagram of Ultra Precision Cutting Unit

PZT 시스템은 비선형적인 특성을 갖고 있기 때문에 정확한 모델링은 불가능하지만, 일반적으로 히스테리시스 특성이 없는 구역내에서 등가질량, 등가감쇄계수, 등가강성을 가진 시스템으로 모델링 할 수 있다.

Fig.2에서 보는 것처럼 PZT의 변위는 초정밀 미소절삭 장치의 탄성힌지에 의하여 구속되며, 탄성힌지는 기구학적으로 가이드역할을 한다. 탄성힌지의 강성계수는 로서 다음 식(1)과 같다.

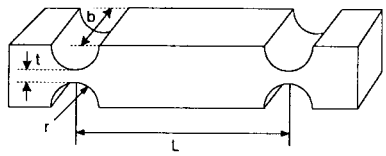


Fig.2 Flexure Hinge

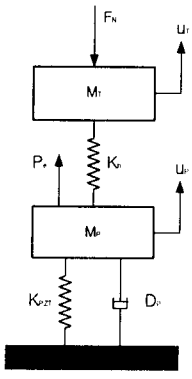
$$K_h = \frac{8Eb t^{5/2}}{9\pi r^{1/2} L^2} \qquad (1)$$

E : Yonug's modulus, b : 힌지 폭,

t : 힌지 두께, L : 힌지 간격, r : 노취 반경

다이아몬드 툴은 탄성힌지의 끝 부분에 장착되며, 툴과 가공물의 상대변위가 가공물의 표면거칠기 또는 가공에러에 직접적인 영향을 미치게 된다. 이때 선반에 의한 수직 절삭력 F_N이 초정밀 미세 절삭장치에 영향을 미치게 된다.

이러한 초정밀 미세 절삭장치를 집중질량모델로 나타내면, Fig.3과 같다. Fig.3에서 보는 것처럼 PZT의 변위는 u_P, 툴의 변위를 u_T라고 하면, 2자유도의 진동 시스템으로 등가화 할 수 있다.



u_P : 압전소자의 변위
u_T : 툴의 변위
M_P : 압전소자의 등가질량
M_T : 툴의 등가질량
D_P : 압전소자의 등가 감쇄계수
F_N : 가공물이 공구에 미치는힘
K_{PZT} : 압전소자의 등가 강성계수
P_e : 압전소자의 등가힘
d_P : 압전소자의 전하상수
c_P : 압전소자의 탄상계수
ϵ : 압전소자의 유전율
K_h : 탄성힌지의 강성계수

Fig.3 Equivalent lumped mechanical model of Ultra-precision Cutting Unit

PZT는 기계적으로는 2차 시스템으로, 전기적으로는 등가 1차 시스템으로 모델링 할 수 있으며, PZT의 등가질량에 대하여 뉴톤의 운동방정식을 적용하여 힘의 평형 방정식을 구하면 다음 식(2)와 같다.

$$M_P\ddot{u}_b + D_P\dot{u}_b + K_{PZT}u_P = P_e - (1+\frac{c_P d_P}{\varepsilon})K_h(u_P - u_T) \quad (2)$$

여기서 P_e는 PZT에 인가되는 전압과 압전전압궤환 등에 의하여 최종적으로 PZT에 작용하는 전압에 의하여 발생되는 등가 힘이며, 우변의 두 번째 항은 초정밀 미세 절삭장치의 탄성힌지 부분이 PZT를 구속하여 발생시키는 힘에 의한 영향이다. 그리고 식(2)를 라플라스 변환하면 다음 식(3)과 같이 된다.

$$(M_P s^2 + D_P s + K_{PZT})u_P(s) = P_e(s) - (1+\frac{c_P d_P}{\varepsilon})K_h(u_{P(s)} - u_T(s)) \quad (3)$$

PZT의 변위 u_P는 등가 힘 P_e와 PZT 변위와 툴의 변위차에 의하여 생성되는 탄성힌지의 탄성력의 합에 의하여 구해지며, 툴의 변위 u_T는 PZT의 변위와 툴의 변위 사이의 전달함수에 의하여 구해지는데 이 전달함수는 절삭력 모델과 관계가 있다. 그리고 툴 부분의 등가질량에 대한 힘의 평형 방정식을 구하면 다음 식(4)와 같다.

$$M_T\ddot{u}_T + K_h(u_T - u_P) = -F_N \quad (4)$$

여기서 M_T는 공구의 등가 질량, F_N은 절삭역학에 의하여 가공물이 툴에 미치는 힘이다. 여기에서 절삭력과 공구 변위와의 관계에 대한 모델링이 필요하게 된다. Fig.4는 직선형 공구인선의 절삭력 모델에 대한 개략도 이다.

절삭깊이 t가 주어지고 이송량 f가 주어지면 절삭깊이와 이송량의 곱으로 나타나는 절삭면적에 의해서 발생하는 마찰력은 다음식 (5)와 같다. 여기서 K_s는 재료의 비절삭 저항이다.

이상과 같이 절삭면적에 작용하는 마찰력을 구할 수 있으며, 공구의 수직으로 작용하는 Z방향 힘은 다음식 (6)과 같다

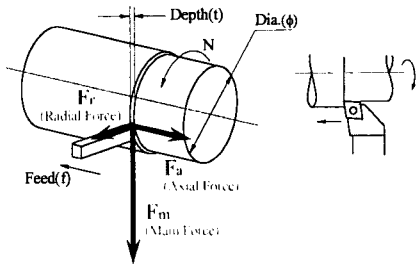


Fig.4 Cutting Force Model of straight Type Tool

$$F_b = 0.3K_s \times t \times f \quad (5)$$

$$F_f = 0.2K_s \times t \times f \quad (6)$$

여기서 공구의 Z방향으로 작용하는 절삭력 강성계수를를 식(7) 같이 정의한다. 그리고 공구의 변위가 그대로 절삭과정에 전사된다면 절삭 깊이 t는 공구의 변위 이므로 공구부분의 힘의 평형방정식인 식(4)를 식(8)과 같이 다시 표현할 수 있다. 식(8)을 라플라스 변환하여 공구의 변위와 압전소자의 변위와의 전달함수를 구하면 식(9)와 같이 된다.

$$K_T = 0.2 \times K_s \times f \quad (7)$$

$$M_T\ddot{u}_T + K_h(u_{T-}u_P) = -K_T u_T \quad (8)$$

$$U_T(s) = \frac{K_s}{M_T s^2 + K_h + K_T} U_P(s) \quad (9)$$

절삭력과 공구변위와의 관계를 구하면 식(10)과 같다. 여기서 공구에 수직으로 즉, Y방향으로 작용하는 절삭력의 강성계수를 라고 하고, 식(11)과 같이 정의한다. 식 (11)로부터 공구변위와 절삭력과의 관계는 식(12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_m = K_s \times t \times f \quad (10)$$

$$K_c = K_s \times f \quad (11)$$

$$F_M = K_c U_T \quad (12)$$

이상의 절삭력 모델링과 압전소자와 공구에 대한 힘의 평형방정식으로부터 최종적인 UPCU의 블록선도를 그리면 Fig.5와 같다.

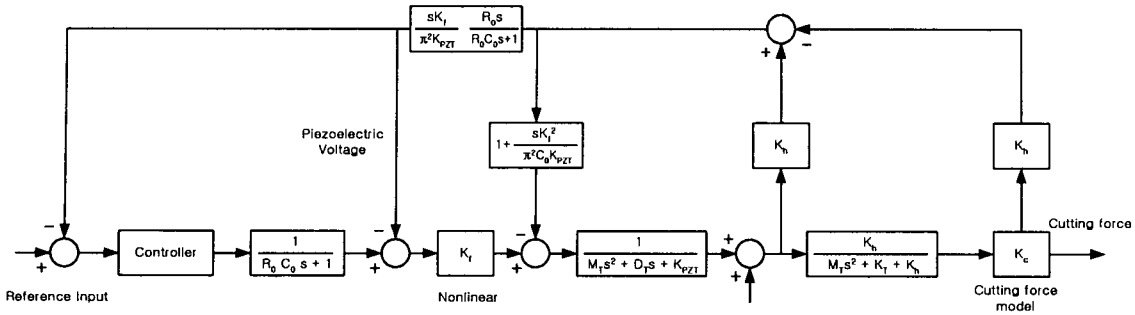


Fig.5 Block Diagram of Ultra-Precision Micro Cutting Apparatus

3. 절삭력 예측 시뮬레이션

본 논문에서는 직선운동시스템을 안정화하기 위한 제어기로서 우수한 성능을 가지는 디지털 PID제어기를 사용하였다. 일반적으로 비례이득의 증가는 시스템의 공진 주파수를 높이는 반면 감쇠를 감소시키며, 미분이득의 증가는 공진 진폭을 감소시키며 감쇠력을 증가시켜 제어루프의 안정성을 향상시킨다. 그리고 적분이득의 증가는 출력이 입력 지령치와 일치하도록 하여 정밀도를 향상시킨다. 일반적인 상용의 제어기들은 이들을 모두 조합한 PID제어기에 위상보상을 첨가한 것이 많으며 이는 최근 많이 연구되고 있는 LQG제어, H∞제어, 슬라이딩 모드제어 등의 견실 제어기에 비해 큰 외란에 대한 견실성은 떨어지나 응답성 및 안정성 등에 있어서 상당히 우수한 것으로 평가되고 있다. 또한 본 논문의 적용의 대상이 되는 작업이 대부분 초정밀 작업을 위하여 초청정 환경에서 이루어지며 주로 비접촉 작업에 이용되므로 외란에 대한 영향은 그리 크지 않다고 할 수 있다. 특히 실제 산업현장에서의 적용의 용이성과 안정성을 위하여 디지털 PID제어기를 설계하여 사용하였다.[6]

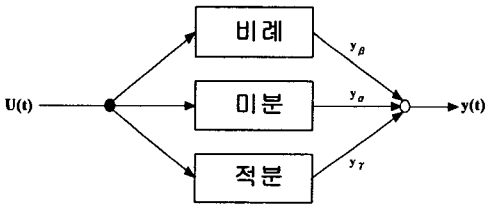


Fig.6 Block Diagram of PID Controller in UPCU

$$\frac{Y_\beta(s)}{U(s)}=\beta,\ \frac{Y_\alpha(s)}{U(s)}=\frac{\alpha s}{\alpha T s+1},\ \frac{Y_\gamma(s)}{U(s)}=\frac{\gamma}{s} \quad (13)$$

$$s=\frac{2}{T}\times\frac{z-1}{z+1} \quad (14)$$

$$y_\beta[i]=\beta\, u[i]$$

$$y_\alpha[i]=\frac{2\alpha-1}{T(2\alpha+1)}y_\alpha[i-1]+\frac{2}{T(2\alpha+1)}(u[i]-U[i-1]) \quad (15)$$

$$y_\gamma[i]=y_{\gamma[i-1]}+\frac{\gamma T}{2}(u[i]-u[i-1]) \quad (16)$$

$$\frac{U_{AMP}}{E}=\beta+\frac{\gamma}{s}+\frac{\alpha s}{\alpha T s+1} \quad (17)$$

Fig.5의 블록선도를 Matlab Simulink를 이용하여 시뮬레이션하고 해석하였다.

테이블의 이송오차가 없는 이상적인 경우에 UPCU에 의하여 일정한 절삭깊이를 주어 가공물을 가공하고 있는 중에 Z축 방향으로 절삭력은 일정하게 유지되지만 여기에 이송오차가 있다면 UPCU의 Z축 방향힘으로 작용하게 된다.

Fig.7은 Laser 간섭계를 이용하여 측정한 Z축 이송오차를 측정한 것으로 주어진 이송속도에 대하여 시간축에 대한 테이블의 이송오차를 식(18)과 같이 8차 다항식으로 보간하여 시뮬레이션에 이용하였다.

$$Z=A+B_1t+B_2t^2+B_3t^3+B_4t^4+B_5t^5+B_6t^6+B_7t^7+B_8t^8 \quad (18)$$

즉, 시간축에 대하여 테이블의 이송오차는 최대 2㎛의 진폭을 가지고 있으며, 보간된 8차 다항식을 전체시스템의 블록선도에서 압전소자 변위부분에 외란으로 추가하였다. 따라서 적절한 제어가 이루어지지 않는 경우에는 이 외란이 Z축 방향으로 공구의 변위와 절삭 면적의 변화를 가져오므로 주절삭력의 변화가 나올 것으로 예측할 수 있다.

Table 1 Parameter of Polynomial Regression for Z Table Motion

Parameter	Value	Error
A	6.99681E-4	4.60198E-8
B_1	7.06565E-10	1.06249E-10
B_2	-1.39284E-12	7.91961E-14
B_3	5.04972E-16	2.67693E-17
B_4	-8.51452E-20	1E-20
B_5	7.9998E-24	1E-20
B_6	-4.33042E-28	1E-20
B_7	1.26199E-32	1E-20
B_8	-1.52951E-37	1E-20

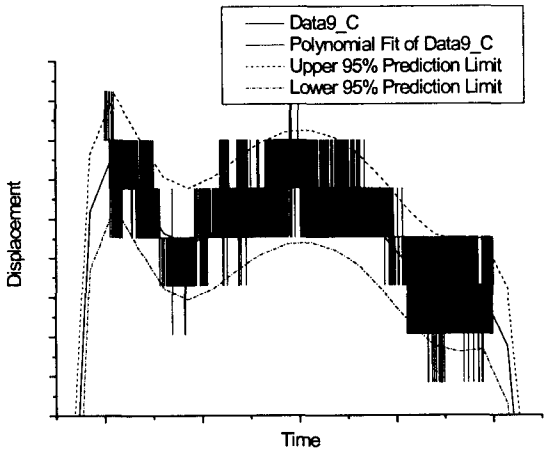


Fig.7 Z Table Motion Measured by Laser Interferometer

Table 2 Parameter of PID Controller

Parameter	Value
P	β 0.01
I	γ 800
D	α 5×10^{-7}
	Tα 2.5×10^{-11}

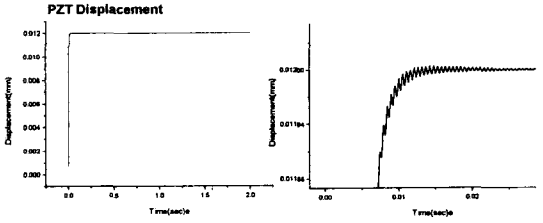


Fig.8 PZT Displacement of UPCU

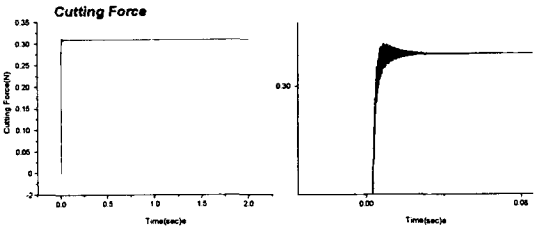


Fig.9 Cutting Force of UPCU

Table 2는 PID 제어기의 파라메터를 내었으며, Fig.8과 Fig.9는 UPCU의 PZT 변위와 절삭력의 변화를 보여주고 있다. 여기서 PID 제어기에 의해 적절한 제어가 이루어지고 있다는 것을 알 수 있으며, 절삭력의 크기를 시뮬레이션을 통하여 예측 할 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 초정밀 가공을 위하여 미세절삭유닛인 UPCU를 모델링 하였고, 시뮬레이션 행하였으며, 테이블의 이송오차를 시스템에 외란으로 주어 절삭력 모델링을 하여, 절삭력의 변화를 예측하였다.

이러한 결과값은 차후 제작되어 연구되어질 UPCU의 제어의 기초 데이터로 활용되며, 시행착오를 줄이는 효과를 가져올 것이다.

차후 연구 과제느 제작되어진 UPCU와 시뮬레이션의 결과를 최대한 일치 시켜서 절삭력 예측 시뮬레이터를 완성하여야 하며, 가공조건 및 재질의 변화에 따라 정보를 수집하여야 할 것이다.

후 기

본 논문은 과기부 과학재단지정 지역협력 연구센터인 레이저응용신기술연구센터의 2003년도 연구비 지원에 의해 연구되었음.

참 고 문 헌

(1) J. D. Kim, 1998, "A Study on the Waviness Compensation System od Ultraprecision Machining", *KSMTE*, Vol. 7, No. 6, pp. 132~140.

(2) J. D. Kim, D. S. KimF, 1994, "Surface characteristics of magnetic-disk cutting using single-crystal diamond tool in an ultraprecision lathe", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 59, pp. 303~308.

(3) M. Shiraishi, K. Uehara, 1979, "In-Process Control of Workpiece Dimension in Turning", *Annal of The CIRP*, Vol. 28, pp. 333~337.

(4) Y. Takeuchi, M. Sakamoto, K. Imura, 1985, "Development of Integrated Tuning System with predictive Compensatory Function for Machining Error", *Annal of The CIRP*, Vol. 34, pp. 519~523.

(5) J. Y. Kim, K. T. Park, L. K. Kwac, J. H. Han, C. H. Kim, 2002, "Computer Similation and Cintrol Performance Evaluation for Feedback System of Ultra Positioning by using Laser Interferometer", *KSMTE*, Vol. 11, No. 1, pp. 17~25.

(6) K. T. Park, J. Y. Kim, L. K. Kwac, 2002, "Simulation and Control Performance Evaluation pf Ultra-precision Single Plane X-Y Stage", *KSMTE*, Vol. 11, No. 5, pp. 65~72.