

정밀 연삭가공을 위한 제어시스템 설계

오창진*, 김옥현**

Control System Design for Precision Grinding

C. J. Oh*, O. H. Kim**

* 충북대학교 기계공학과 대학원

** 충북대학교 공과대학 기계공학부

Abstract

Design of an in-process feedback control system has been studied for precision grinding. A grinding system consists of a grinding tool, a turn table and a disk-shaped workpiece on the table is taken as an object.

A grinding process model has been deduced which gives some reasoning about the process errors. In the control system the tool position is actively controlled by an electro-magnetic actuator in-process. The ground error is feedback to compose a closed-loop control system and an optimal PID controller is applied. Some control performances such as transient response and disturbance attenuation have been examined, which convinces the effectiveness of the control. Some methods for implementation of the control have been suggested from a standpoint of practical application.

1. 서론

과학기술의 발전에 따라 초정밀가공기술에

대한 요구가 증대되고 있으며 특히 인공위성 탑재용 반사경, 레이저 프린터 등 광학 부품에 있어서는 수 나노미터 정도의 가공정밀도를 요구하고 있다.

절삭 및 연삭 등 기계가공에서 발생하는 오차는 공작기계의 이송 오차, 절삭력에 의한 소재의 변형, 채터링(chattering), 공구마모 등 여러 요인에 기인한다. 초정밀 가공을 위하여 공작기계의 방진마운팅, 채터링의 능동제어[1], 공구위치의 피드백제어 등의 연구노력이 수행되고 있으나, 보다 높은 가공정밀도를 기대할 수 있는 방법은 가공중에 소재의 가공된 치수를 피이드백하여 실시간으로 제어하는 것이다. 그것은 실제 가공중에 가공오차 정보를 획득하고 공구의 위치를 액추에이터를 사용하여 제어함으로써 원하는 가공치수를 얻는 방법이다[2-4].

본 연구에서는 정밀가공 공정인 연삭공정에서 실시간으로 소재의 가공오차를 피이드백하여 연삭휠의 위치를 제어함으로써 연삭정밀도를 향상시키는 제어시스템의 설계에 관한 연구를 수행하였다. 회전테이블 위에 원판형 소재가 장착되며 고속으로 회전하는 연삭 휠에 의해 연삭가공 되는 공정을 대상

으로 하였다. 이와 같은 공정에서 연삭 휠은 고속스핀들에 의해 회전되며 고속스핀들은 전자력 방식의 액추에이터에 의해 위치 제어된다. 가공중에 소재의 가공오차를 실시간으로 피이드백함에 있어 가장 큰 문제는 가공중의 절삭유, 칩, 연삭면의 센서접근 곤란 등에 의한 소재 가공치수의 실시간 측정 어려움이다. 본 연구에서는 직접측정의 어려움을 극복하기 위하여 다른 측정가능한 변수들을 측정하여 가공치수를 간접 측정하는 방법을 제시하였다. 가공시 발생하는 여러가지 교란(disturbance)을 고려한 연삭공정의 해석모델을 유도하였으며 차수가 상대적으로 낮아 구현이 용이한 최적 PID 제어를 설계하였다. 그 제어 효과를 과도응답특성과 교란억제성능의 관점에서 검토하였으며 본 제어시스템의 실제 구현 방법에 관하여 토론하였다.

2. 제어시스템 구성

Fig.1 에 본 연구의 연삭시스템의 구성을 보였다. 그림에서 보는 바와 같이 연삭휠은 소재 방향으로 피이딩(feeding)되며 원판형 소재는 회전테이블 위에 장착되어 회전된다. 원판형 소재는 연삭 휠의 수직방향 피이딩과 회전테이블의 수평방향 피이딩에 의해 곡면가공이 수행된다. 연삭휠과 회전테이블의 피이딩은 계단식(stepwise)로 주어지는 경우를 생각한다.

이와같은 연삭시스템에서 가공치수오차는 회전테이블의 회전시 기울음오차(tilting error) 및 변형, 연삭휠의 마모 및 진동, 연삭휠 및 회전테이블의 피이딩 오차에 기인한다. 본 연구에서 피이딩 오차에 의한 영향은 연삭

가공전에 이송오차 측정 데이터에 의한 오차보정에 의해 극복하는것으로 하였으며 회전 테이블의 운동오차, 연삭휠의 마모 및 진동에 의한 가공오차를 실시간 제어하는 것으로 하였다. 그림에서와 같이 연삭휠은 전자력식 액추에이터에 의해 제어되며 회전테이블의 운동변위와 연삭휠의 변위가 측정되어 제어기로 피이드백 된다.

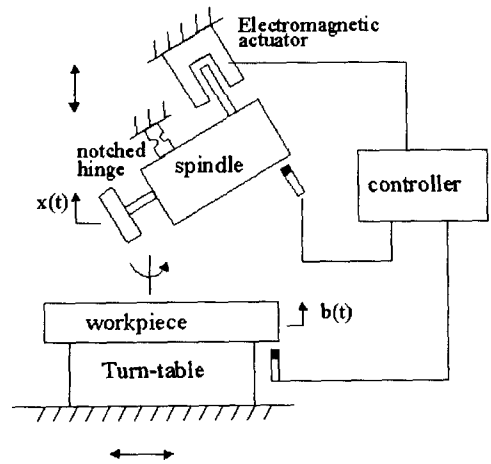


Fig.1 Schematic of a grinding control system

3. 제어시스템 모델링

앞절에서 설명한 바와 같은 연삭공정의 해석 모델을 Fig.2 에 보였으며 Fig.3 에 연삭휠의 동적 모델을 보였다. 그림에서 사용한 기호는 다음과 같다.

$x(t)$: 연삭휠의 설정 위치로부터의 변위

$b(t)$: 회전테이블의 수직방향 운동변위

$\Delta r(t)$: 연삭휠의 반경방향 마모길이

$d(t)$: 순간 연삭 깊이

$w(t)$: 원하는 순간 연삭깊이

$e(t)$: 연삭오차

$F_u(t)$: 연삭휠의 제어입력

$F_g(t)$: 연삭저항

위와 같은 기호 정의로 다음과 같은 관계식을 얻는다.

기하학적이 고찰로부터

$$e(t) = x(t) + \Delta r(t) - b(t) \quad (1)$$

$$d(t) = w(t) - e(t) \quad (2)$$

연삭저항 $F_g(t)$ 는 다음과 같이 가정한다.

$$F_g(t) = k_g d(t) \quad (3)$$

연삭휠의 동적특성은 1 자유도계로 가정하여 다음의 운동방정식을 얻는다.

$$k_t (\ddot{x}/\omega_n^2 + 2\zeta\dot{x}/\omega_n + x) = F_g(t) + F_u(t) \quad (4)$$

위의 식들로부터 아래 Fig.4 와 같은 블록 선도를 얻는다. 이 그림의 블록선도에서 $G_v(s)$ 는 전자력식 액추에이터의 전달함수이며 $n(s)$ 는 센서 잡음이다.

4. 제어기설계

제어기는 상대적으로 차수가 작은 PID의 구조로 하였으며 최적제어 알고리즘을 적용하여 게인값을 결정하였다.

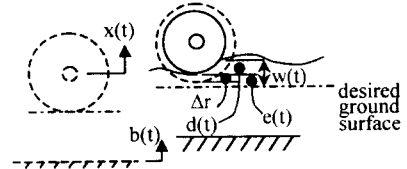


Fig.2 Grinding process model

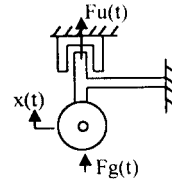


Fig.3 Tool dynamics model

최적 PID 제어기의 설계과정은 다음과 같다. 액추에이터의 응답특성이 식(4)로 표현되는 연삭휠의 응답특성보다 훨씬 빠른 것으로 가정하여 $G_v(s)=1$ 로 가정하였다.

식(1)의 $x(t)$ 를 식(4)에 대입하고, 식(2)의 $d(t)$ 를 식(3)에 대입하여 구한 $F_g(t)$ 를 식(4)에 대입하여 다음의 식을 얻는다.

$$\ddot{e}/\omega_n^2 + 2\zeta\dot{e}/\omega_n + (1 + k_g/k_t)e = F_u/k_t + (k_g/k_t)w + \dot{v}/\omega_n^2 + 2\zeta\dot{v}/\omega_n + v \quad (5)$$

윗식에서

$$v(t) = \Delta r(t) - b(t) \quad (6)$$

이다.

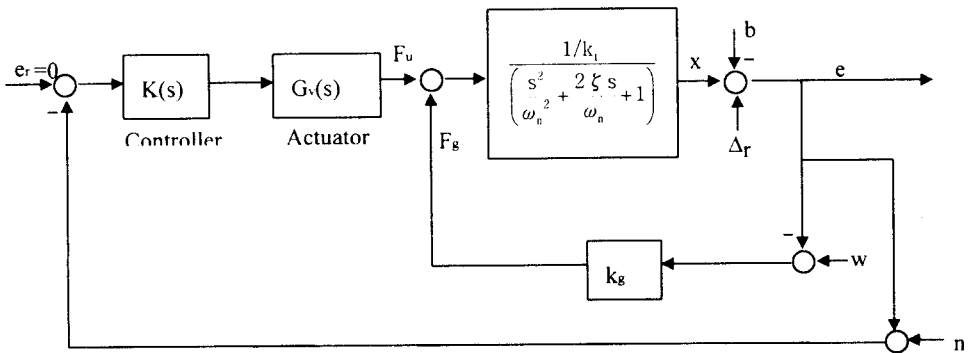


Fig.4 Block diagram of a grinding control system

식(5)로부터 아래와 같은 상태 방정식을 얻는다.

$$\begin{cases} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \\ \dot{e}_3 \end{cases} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -\omega_n^2(1+k_g/k_t) & -2\zeta\omega_n & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{cases} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{cases} + \begin{cases} 0 \\ \omega_n^2/k_t \\ 0 \end{cases} F_u + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega_n^2 & 2\zeta\omega_n & 1 & \omega_n^2(k_g/k_t) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{cases} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \end{cases} \quad (7)$$

윗식에서,

$$e_1 = e, \quad e_2 = \dot{e}, \quad e_3 = \int e dt, \quad (8)$$

$$w_1 = v, \quad w_2 = \dot{v}, \quad w_3 = \ddot{v}, \quad w_4 = w \quad (9)$$

최적화를 위한 목적함수는 다음과 같이 설정하였다.

$$J = \int (\bar{e}^T Q \bar{e} + R F_u^2) dt \quad (10)$$

식(7)과 (10)을 가지고 Riccati equation 을 사용하여 최적 PID 제어 게인을 구한다.

아래와 같은 데이터를 사용하였으며,

$$k_t = 4 \times 10^4 \text{ N/m}, \quad \zeta = 0.05, \quad \omega_n = 100 \times 2\pi \text{ rad/s}, \quad (11)$$

$$G_v(s) = 1, \quad k_g = 2.5 \times 10^6 \text{ N/m}$$

최적 게인을 구하기 위한 가중치는 아래와 같이 설정하였다.

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad R = 10^{-15} \quad (12)$$

위와 같은 데이터로부터 구한 최적 PID 게인 값은 다음과 같다.

$$k_p = 1.69 \times 10^8 \text{ N/m}, \quad k_d = 6.95 \times 10^3 \text{ N's/m}, \quad (13)$$

$$k_i = 1.46 \times 10^8 \text{ N/m-s}$$

5. 제어기 성능평가

앞절에서 설계한 최적 PID 제어기의 성능을 평가하기 위하여 Fig.4 의 블록선도로부터 안정성, 주파수응답특성 및 과도응답특성을 평가하였다. Fig.5 는 상대안정성 평가를 위한 제어시스템의 개루프의 Bode 선도이며 만족할만한 상대안정성을 확보하고 있음을 보이고 있다.

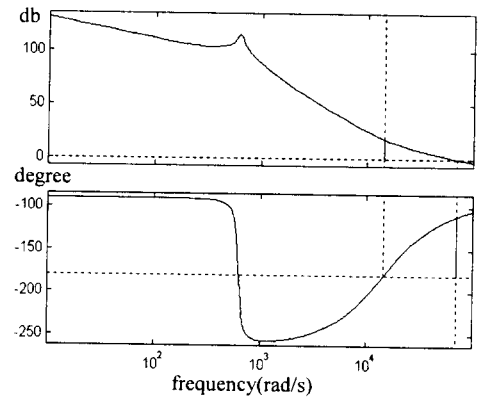


Fig.5 Openloop Bode plot, G.M=18db, P.M=70degree

Fig.6 은 회전테이블의 상하운동 $b(t)$ 에 대한 가공오차 $e(t)$ 의 주파수응답특성이며 Fig.7 은 소재의 표면의 굴곡 $w(t)$ 에 대한 $e(t)$ 의 주파수응답이다. 그림에서보는 바와 같이 본 제어기는 매우 효과적인 교란제거 능력을 가짐을 알수있다. Fig.8 은 센서잡음 $n(t)$ 에 대한 $e(t)$ 의 주파수응답을 보이고 있으며 저주파수 영역에서의 센서 잡음에 대한 영향은 거의 제거되지 않고 있음을 보인다.

Fig.9 는 $w(t)$ 의 단위 계단입력에 대한 $e(t)$ 의 시물레이션 결과이며 Fig.10 은 제어입력 $F_u(t)$ 의 결과이다. 그림의 결과는 매우 우수한 과도응답 특성을 보이고 있으며 실제 연삭공정시 $w(t)$ 가 수 마이크로의 크기임을 고려

할 때 제어입력 $F_u(t)$ 도 과도하지 않음을 보이고 있다.

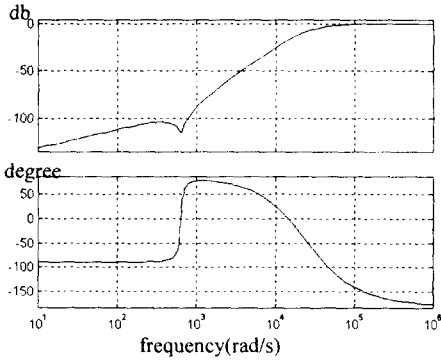


Fig.6 Frequency response of $e(s)/b(s)$

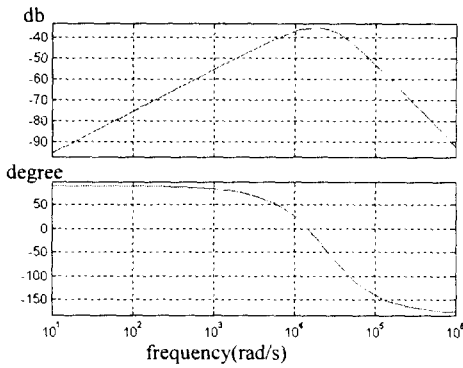


Fig.7 Frequency response of $e(s)/w(s)$

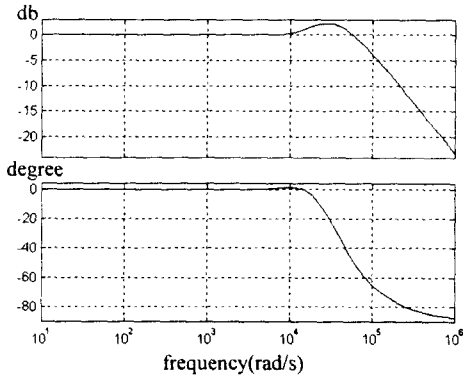


Fig.8 Frequency response of $e(s)/nw(s)$

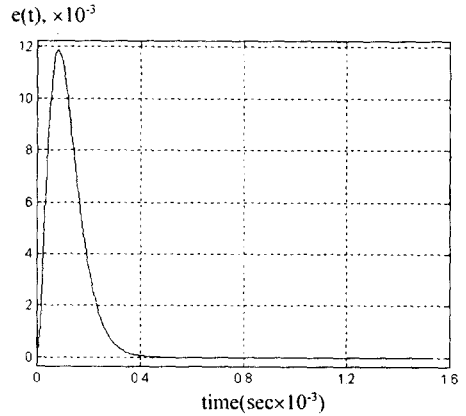


Fig.9 Unit step response of $e(t)$ to $w(t)=1$.

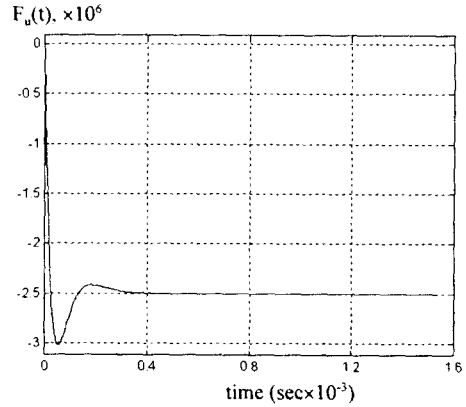


Fig.10 Unit step response of $F_u(t)$ to $w(t)=1$

6. 토론

연삭공정중에 가공오차 $e(t)$ 를 실시간으로 직접 측정하는 것은 연삭중의 절삭유, 칩, 연삭점의 센서 접근 어려움 등으로 인하여 실제로는 매우 어려운 일이다. 또한 공구의 반경방향 마모 $\Delta_r(t)$ 를 연삭중에 측정하는 것도 역시 실제 구현이 매우 어려운 문제이다.

따라서 본 연구에서는 $\Delta_r(t)$ 는 단속적으로, 즉 일정 시간 연삭후 연삭휠을 소재로부터 이탈시켜 측정하는 것으로 계획하고 있으며,

$e(t)$ 의 측정은 Fig.1에서 보인바와 같이 회전테이블의 운동 $b(t)$ 와 연삭휠의 진동 $x(t)$ 를 측정하여 식(1)로부터의 계산에 의해 결정하는 간접 측정방식을 계획하고 있다.

한편 Fig.8에서 보는 바와 같이 센서 잡음에 대한 교란 제거가 효과적으로 수행되지 않음으로부터 가공오차 $e(t)$ 의 간접측정시 센서잡음에 대한 각별한 주의가 요구됨을 알수있다.

또한 Fig.1에서 보인 바와 같은 회전테이블의 운동 $b(t)$ 를 측정함에 있어 측정된 신호에는 측정면의 형상과 운동변위 효과와 동시에 나타난다. 이 문제를 해결하기 위하여 다수의 센서를 사용하여 측정면의 형상에 의한 신호를 제거하는 방법[5,6]을 계획하고 있으며, 또한 회전테이블의 운동 $b(t)$ 는 기울음오차(tilting error)에 의한 것이 주도적일 것으로 판단되므로 회전테이블의 회전중심과 공구의 연결직선상의 일정거리 위치에서 측정함으로써 비례 관계로부터 연삭점의 회전테이블 운동변위를 측정할 수 있을 것으로 생각하고 있다.

7. 결론

본 연구에서는 정밀 연삭시 실제 가공중에 가공오차를 측정하여 피드백 함으로써 가공정밀도를 향상시키기 위한 제어시스템 설계에 관하여 연구를 수행하였다.

이와같은 정밀연삭 제어시스템의 해석 모델을 제시 하였으며, 최적 PID 제어에 의해 효과적으로 과도응답 특성이 향상됨과 소재의 운동오차, 소재의 표면의 불균일성에 의한 외부 교란 영향 크게 감소시킬 수 있음을 보였다. 그러나 센서 잡음에 의한 영향은 감소 효과를 얻을수 없었으므로 센서 잡

음에 대한 특별한 대책이 요구되고 있다. 또한 실제로 제어시스템을 구현하기 위한 구체적 방법론을 제시하였으며 이에 관하여 검토하였다.

참고문헌

- [1] R. L. Kegg, "Cutting Dynamics in Machine Tool Chatter, Contribution to Machine-Tool Chatter Research-3," Trans. ASME, J. of Engng. for Industry, 1965, pp.464-470
- [2] T. Yazawa, T. Kohno, Y. Uda and N. Ohno, "In-Process Workpiece Referred Form Accuracy Control(6th report)," 精密工學會誌 Vol. 64, No.12, pp.1806-1810, 1998
- [3] T. Higuchi, T. Yamakuchi and M. Tanaka, "Development of a High Speed Non-Circular Machining NC-Lathe for Cutting a Piston-head of a Reciprocating Engine by Use of a New Servo Mechanism Actuated by Electromagnetic Attractive Force," 精密工學會誌 Vol. 62, No.3, pp.453-457, 1998
- [4] T. Kohno, S. Kohno, D. Saito and T. Yazawa, "Diamond Turning Figure Control by In-process Measurement," American Society for Precision Engineering, Proceedings Vol.18, pp.92-95, 1998
- [5] W. Gao and S. Kiyono, "On-Machine Profile Measurement of Machined Surface Using the Combined Three-Point Method," JSME International Journal, Vol.40, No.2, pp.253-259, 1997
- [6] S. Kiyono and W. Gao, "On-Machine Measurement of Large Mirror Profile by Mixed Method," JSME International Journal, Vol.37, No.2, pp.300-306, 1994