

슬라이딩 모드 제어를 응용한 선삭공정 절삭력 제어 Cutting Force Regulation in Turning Using Sliding Mode Control

박영빈(서울대 대학원), 김종원(서울대 기계설계학과)

Young-Bin Park(Graduate School, Seoul National Univ), Jongwon Kim(Seoul National Univ)

ABSTRACT

Continuous sliding mode control is applied to turning process for cutting force regulation. The highest feedrate compatible with the allowable cutting force is applied in rough cutting process such that maximum productivity is ensured and tool breakage is avoided. The programmed feedrate is overridden after the control algorithm is carried out. However, most CNC lathe manufacturers offer limited number of data bits for feedrate override, thus resulting in nonlinear behavior of the machine tools. Such nonlinearity brings "quantized" effect, and the optimal feedrate is rounded off before being fed into the CNC system. To compensate for this problem, continuous sliding mode control is applied. Conventional switching control law at a sliding surface is replaced by a smooth control interpolation in a selected boundary layer to avoid the excitation of high-frequency dynamics. Simulation results are presented in comparison with those obtained by applying adaptive control.

Key Words : turning process(선삭공정), continuous sliding mode control(연속 슬라이딩 모드 제어), cutting force regulation(절삭력 제어), sliding surface(슬라이딩 평면), boundary layer(경계층), 4-bit feedrate command element(4 비트 이송속도 지령 요소)

1. 서 론

CNC 공작기계는, 프로그램된 지령에 따라서 공구를 빠르고 정확하게 원하는 위치로 이송시킴으로써 초적의 가공조건에서의 가공을 가능케 한다. 그러나 이러한 가공조건 선정은 아직도 숙련된 NC 프로그래머의 경험에 의존하고 있는 실정이다. NC 프로그래머는 가공물의 재질, 공구의 종류 등을 고려하여, 공작기계가 안전하게 작동하는 범위 내에서 주축 회전속도, 이송속도, 절삭깊이를 결정한다. 따라서 최악의 절삭상태에 맞춰서 프로그램을 하게 되므로 공작기계를 최대의 출력으로 사용할 수 없다.

이러한 문제를 해결하기 위해, 주축 회전속도나 이송속도를 절삭깊이에 따라서 변화하여 기준 절삭력을 추종제어하는 제어기가 개발되고 있다. 특히, 적응제어를 통하여 최적의 이송속도를 구현한 연구 사례들을 많이 찾아볼 수 있다 [1-8]. 가공 중에는

절삭깊이가 계속적으로 변하고 공구와 소재도 교체되므로, 절삭공정 모델변수가 일정하게 유지되지 않는다. 이처럼 제어대상계가 불확실한 변수를 포함하고 있는 경우에 적합한 제어 기법이 적응제어이다.

기존의 연구에서는 적응제어 알고리즘에서 계산된 이송속도가 공작기계의 이송서보모터로 직접 입력되는 방식을 택했으나, 최근 들어 절삭공정 적응제어 이론을 상용화된 CNC 공작기계에 적용하기 위해서 기존 CNC의 구조를 크게 변화시키지 않고 적응제어 시스템과 표준접속하는 방법이 연구되고 있다 [8]. 적응제어 알고리즘에 의하여 계산된 이송속도 지령은, NC 프로그램에서 프로그램된 기준 이송속도의 백분율인 오버라이드 값으로 환산된다. 이 오버라이드 값은 이진 데이터의 형태로서 CNC로 전달된다.

상용화된 CNC 머시닝센터에서는 8비트 이진 데이터를 전달하므로 0에서 255%까지 연속적인 이송

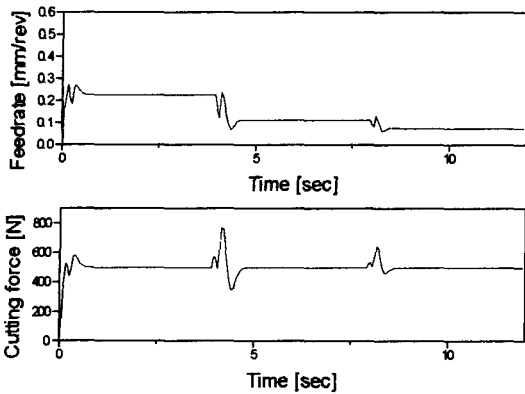


Fig. 1 Adaptive control system response without the nonlinear feedrate override element

속도 오버라이드가 가능하다. 따라서 절삭력 제어를 위한 적응제어 기법은, 기존의 CNC 머시닝센터에서는 만족스러운 결과를 가져왔으나, 상용화된 CNC 선반에서는 적용이 어려운 실정이다. 그 이유는, CNC 선반은 이송속도 오버라이드가 4 비트로 제한되어 있어서 제어 입력을 연속적으로 CNC에 전달할 수 없기 때문이다. 따라서, 추종오차가 발생하고, 모델변수가 일정하게 유지되어도 이송속도 지령치는 계속적으로 변하게 된다.

적용제어를 절삭공정에 적용한 경우의 시뮬레이션 결과는 Fig. 1과 Fig. 2에 표시되어 있다. 기준 절삭력은 500 N, 프로그램된 이송속도는 0.2 mm/rev, 주축 회전속도는 600 rpm으로 가정한다. 총 시뮬레이션 시간은 12 초이고, 절삭깊이는 1 mm에서 3 mm까지 4 초마다 1 mm씩 증가한다.

Figure 1은 4 비트 이송속도 지령 요소가 없는 시스템에 적응제어를 적용한 경우인데, 절삭깊이가 변할 때 오버슈트가 발생하는 것을 제외하고는 완벽한 추종성능을 보인다. 그러나 4 비트 이송속도 지령 요소를 고려하면, Fig. 2에 표시된 바와 같이 오버슈트가 발생하는 것 뿐만 아니라 절삭력이 기준값을 중심으로 심하게 진동함을 알 수 있다. 절삭공정에서 이러한 현상들은 낮은 표면 조도, 공구 파손 등의 치명적인 문제들을 야기시킨다.

비선형 요소가 있는 제어대상계를 되먹임하는 경우에 하나의 대안으로 슬라이딩 모드 제어 기법이 있다. 슬라이딩 모드 제어 기법을 적용하면, 다음 두 가지 장애 요소가 존재하는 경우에 효과적으로 대처할 수 있다. 첫째, 절삭공정 모델이 실제 모델과 다르거나 너무 단순화되어서 모델변수가 불확실한 경우이다. 둘째, 시간 지연, 공작기계 이송부의 마찰력 등 모델링에서 고려하지 않은 동역학이 존재하는 경우이다. 슬라이딩 모드 제어 기법은 시

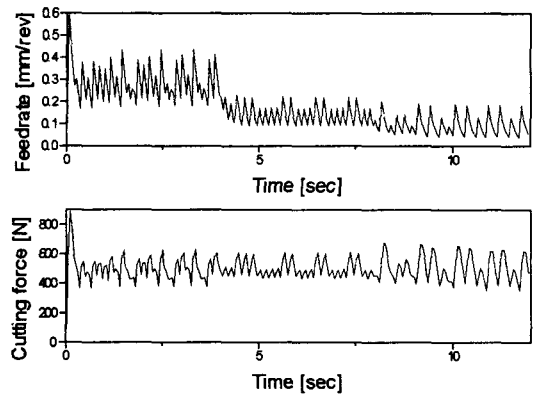


Fig. 2 Adaptive control system response with the nonlinear feedrate override element

스템의 안정성과 성능을 유지하는데 체계적인 접근 방법을 제공한다.

가변구조계(variable structure system) 이론을 둔 슬라이딩 모드 제어에서는, 제어기의 이득을 슬라이딩 평면에 따라 부호가 반대인 값으로 바꿔줌으로써 제어를 실현한다 [9,10]. 이 제어 기법은, 응답 특성과 과도 특성을 향상시키고, 모델변수의 변화 및 외란에 대한 둔감도를 높여준다 [11].

Luo와 Zhang은 슬라이딩 모드 제어를 선삭공정에 적용하여 오버슈트가 감소하고 응답 속도가 빨라짐을 보였다. 또한, 계산시간이 단축되어서 실시간 구현이 가능함을 보였다 [12]. 한편, Chang과 Chen은 가변구조계 이론과 선형계의 극배치 기법을 기반으로 한 견실한 제어 기법을 제안하고, 실험을 통하여 안정성이 보장됨을 증명하였다. [11].

기존의 슬라이딩 모드 제어에서는 과도한 제어 입력과 채터링이 항상 주요 문제로 대두되었다. 이러한 현상들을 방지할 만한 대안으로 경계층 이론을 기반으로 한 연속 슬라이딩 모드 제어 기법이 있는데 [13], 아직까지 선삭공정에는 적용된 사례가 없다. 또한, CNC 선반의 특성인 4 비트 이송속도 지령 요소를 고려한 연구가 없었다. 본 논문에서는, 이러한 문제들을 해결하기 위하여 4 비트 비선형 요소를 포함하고 있는 CNC 선반시스템에 연속 슬라이딩 모드 제어 방법을 적용하고, 시뮬레이션을 통해서 검증하고자 한다.

2. 시스템의 모델링

선삭공정에서의 절삭력 되먹임 제어시스템의 블록 선도가 Fig. 3에 나타나 있다. 제어시스템은 제어기, 4 비트 이송속도 지령 요소, 인터플레이터, 절삭공정으로 구성된다. 제어대상계는 CNC의 인터플레이터

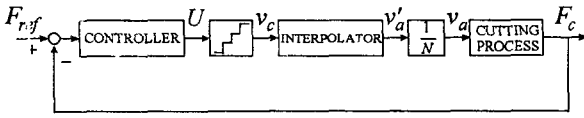


Fig. 3 Block diagram of the force feedback control system

터 포함 절삭공정이다.

본 논문에서 선정한 대상 공작기계의 제어기는 FANUC 0T로서 0에서 150%까지 10% 간격으로 이송속도 오버라이드가 가능하다. 앞에서 언급했듯이 오버라이드의 제한은, 제어시스템과 상용화된 CNC 선반을 표준접속시킬 때 데이터를 4비트까지 밖에 전송할 수 없는 데에 기인하며, 이는 양자화(quantization) 효과를 가져온다.

CNC 시스템에서, 인터플레이터는 공구의 초기 및 최종 위치와 이송속도를 조합하여 요구되는 윤곽을 따라 가공하도록 공구경로를 생성해 주는 역할을 한다. 이송서보계는 인터플레이터보다 상대적으로 빠르므로 인터플레이터만을 고려하여 모델링하면 다음과 같다.

$$\frac{v'_a(s)}{v_c(s)} = \frac{1}{1 + \tau_s s} \quad (1)$$

여기서 $v_c(s)$ 는 이송속도 지령, $v'_a(s)$ 는 실제 분당 이송속도, τ_s 는 인터플레이터의 시상수이다. 인터플레이터의 특성은 CNC의 종류에 따라서 다른데, 일반적으로 비선형적이므로 실험을 통해서 선형적으로 근사시킬 수 있다. 본 논문에서는 τ_s 를 0.17초로 선정한다.

제어 알고리즘으로부터 계산된 이송속도 지령은 분당 이송속도인데, 이는 다음 식을 통해서 회전당 이송속도로 변환시킬 수 있다.

$$\frac{v_a(s)}{v'_a(s)} = \frac{1}{N} \quad (2)$$

여기서 N 은 주축 회전속도이며 단위는 rpm이다. 절삭공정은 절삭력과 실제 회전당 이송속도간의 관계를 나타내는데, 일반적으로 다음과 같이 1차식으로 표현된다 [4,7].

$$\frac{F_c(s)}{v_a(s)} = \frac{K_s d}{1 + \tau_c s} \quad (3)$$

여기서 K_s 는 소재 재질에 따른 비례상수, d 는 절삭깊이, τ_c 는 절삭공정의 시상수이다. 식(3)에서 $K_s d$ 는 선삭공정의 경우 0과 2000사이의 값을 가진다 [7]. 시상수 τ_c 는 주축 회전속도와 밀접한 관련이 있으며, 식(4)와 같이 표현된다 [4].

$$\tau_c = \frac{60(1 - e^{-1})}{N} \quad (4)$$

3. 제어기의 설계

슬라이딩 모드 제어는 제어대상계 변수의 변동이나 외란에 대하여 정확한 정보를 알고 있지 않더라도 경계치만 알고 있다면 강인한 제어를 실현할 수 있다. 또한 미지의 변수를 추정할 필요가 없으므로 제어기 설계 알고리즘이 간단한 이점이 있다.

그러나 기존의 슬라이딩 모드 제어는 슬라이딩 평면을 중심으로 불연속적인 스위칭이 일어나므로, 제어 입력이 커지고 채터링이 발생한다는 단점이 있다. 이러한 문제들을 해결하기 위해 Slotine이 제안한 경계층 이론을 도입하여 연속 슬라이딩 모드 제어를 적용하고자 한다 [14].

앞장에서 유도한 선삭공정 시스템에서 $u = v_c$ (이송속도 지령), $x = F_c$ (실제 절삭력)으로 각각 정의하고 식(1)-식(3)을 결합시키면 식(5)를 얻는다.

$$\begin{aligned} \ddot{x}(t) &= -\frac{1}{\tau_s \tau_c} x(t) - \frac{\tau_s + \tau_c}{\tau_s \tau_c} \dot{x}(t) + \frac{1}{N} \frac{K_s d(t)}{\tau_s \tau_c} u(t) \\ &= a_1 x(t) + a_2 \dot{x}(t) + b(t) u(t) \\ &= f(x(t), \dot{x}(t)) + b(t) u(t) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, 가공 중에 주축 회전속도와 소재의 재질이 일정하게 유지된다고 가정하면, a_1 , a_2 는 상수이고, 절삭깊이 d 에 따라서 제어 입력 계수 b 만 변하게 된다.

이제 절삭력 추종오차와 슬라이딩 평면을 각각 식(6)과 식(7)과 같이 정의한다.

$$\bar{x} = x - x_d \quad (6)$$

$$s = \dot{\bar{x}} + \lambda \bar{x}, \quad \lambda > 0 \quad (7)$$

여기서 x_d 는 목표 궤적, 즉 기준 절삭력이다. 절삭깊이 d 의 경계치를 알고 있으므로 제어 입력 계수 b 를 \hat{b} 로 추정하면, 식(8)의 슬라이딩 조건을 만족하도록 제어 입력을 식(9)와 같이 추정할 수 있다.

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2 \leq -\eta |s|, \quad \eta > 0 \quad (8)$$

$$u = \frac{1}{\hat{b}} [-f + \ddot{x}_d - \lambda \dot{\bar{x}} - k \operatorname{sgn}(s)] \quad (9)$$

여기서 스위칭 항의 계수 k 는 다음 조건을 만족하도록 선정한다.

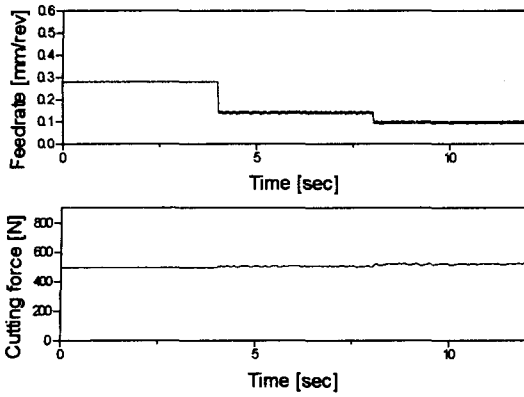


Fig. 4 Continuous sliding mode control system response without the nonlinear feedrate override element

$$k \geq \eta \frac{\hat{b}}{b} + \left| \frac{\hat{b}}{b} - 1 \right| \cdot |f - \ddot{x}_d + \lambda \dot{x}| \quad (10)$$

이상은 기존의 슬라이딩 모드 제어 기법을 설명한 것인데, 여기에 경계층 이론을 적용하면 앞서 언급한 문제들을 해결할 수 있다. 연속 슬라이딩 모드 제어에서는 스위칭 함수를 식(11)과 같은 포화함수로 대체한다.

$$\text{sat}(s/\Phi) = \begin{cases} s/\Phi & \text{if } |s/\Phi| \leq 1 \\ \text{sgn}(s/\Phi) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

여기서 Φ 는 경계층의 폭으로서, 상태 궤적이 이 영역을 벗어나면 식(8)의 제어 법칙을 그대로 적용하고, 영역 내에 들어오면 제어 입력 u 를 보간한다. 즉, $\text{sgn}(s)$ 를 s/Φ 로 대체함으로써, 상태 궤적이 제한된 추종오차의 범위 내에서 부드럽게 슬라이딩 평면을 따라 미끄러지게 한다.

4. 시뮬레이션 결과

연속 슬라이딩 모드 제어 기법을 선삭공정에 적용한 시뮬레이션 결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. 절삭조건은 Fig. 1과 Fig. 2의 경우와 동일하고, 소재의 재질은 강재 SM45C로 가정하여 K_s 를 1773 N/mm²으로 선정한다 [6]. 허용 추종오차 ε 을 기준 절삭력의 5%로 하고 슬라이딩 평면 변수 $\lambda=20$, $\eta=0.1$ 로 설정하면, 경계층의 폭 Φ 는 $\Phi=\varepsilon\lambda$ 의 관계식으로부터 구할 수 있다 [14].

4 비트 이송속도 지령 요소를 포함하고 있는 시스템에서 연속 슬라이딩 모드 제어기는 절삭력을 제한된 범위 내에서 기준 절삭력으로 추종제어한다. 적응제어를 적용한 경우와 비교해 보았을 때 오버

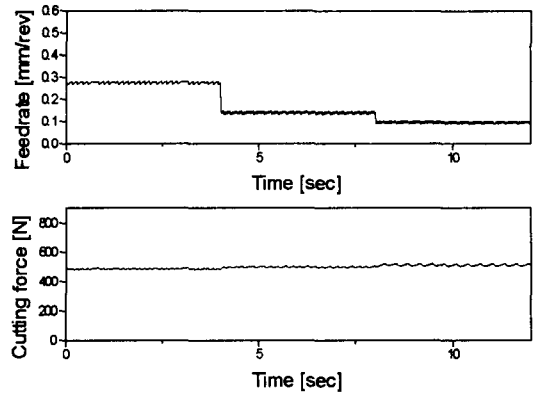


Fig. 5 Continuous sliding mode control system response with the nonlinear feedrate override element

슈트가 현저하게 감소하고 과도 응답 특성도 향상된다. 이송속도와 실제 절삭력의 미세한 진동은 식(11)에 나타나 있는 포화함수에 기인하는데 Φ 의 크기에 좌우된다. 경계층의 폭이 감소할수록 허용 추종오차가 작아지므로 기존의 슬라이딩 모드 제어가 적용되고 chatter링이 발생한다. 반면에, 경계층의 폭이 증가하면 추종오차가 따라서 커지는 대신 chatter링 현상이 방지된다.

Figure 4와 Fig. 5를 비교해 보면, 4 비트 이송속도 오버라이드 요소를 포함하고 있는 경우 chatter링이 증가하지만 절삭력은 만족스러운 추종 성능을 보인다. Chatter링의 발생은 과도한 제어 입력과 이송속도 오버라이드의 제한 때문인데, 허용 추종오차와 Φ 를 크게 하면 억제할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 비선형적인 이송속도 지령 요소를 포함하는 CNC 선반 시스템의 모델을 제시하고, 이송속도 극대화를 위한 절삭력 추종제어에 연속 슬라이딩 모드 제어를 응용하였다.

기존의 슬라이딩 모드 제어기가 가지고 있던 문제점들을 보완한 연속 슬라이딩 모드 제어기는 불확실한 모델과 외란에 대해서도 견실한 제어 성능을 보임과 동시에 과도한 제어 입력과 chatter링을 방지할 수 있다. 또한, 연속 슬라이딩 모드 제어기는 보장된 정확도를 가지고 기준 절삭력을 추종하고, 빠른 응답속도를 가지며, 오버슈트와 언더슈트의 크기를 줄이는 효과를 가져온다. 본 연구에서는 적응제어기와 연속 슬라이딩 모드 제어기의 성능을 비교하여 연속 슬라이딩 모드 제어기의 우수함을 시뮬레이션 결과를 통해 입증하였다.

참 고 문 헌

1. O. Masory and Y. Koren, "Adaptive Control System for Turning," *Annals of the CIRP*, Vol. 29, No. 1, pp. 281-284, 1980.
2. O. Masory, "Real-Time Estimation of Cutting Process Parameters in Turning," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 106, pp. 218-221, 1984.
3. O. Masory and Y. Koren, "Stability Analysis of a Constant Force Adaptive Control System for Turning," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 107, pp. 295-300, 1985.
4. L.K. Daneshmend and H.A. Pak, "Model Reference Adaptive Control of Feed Force in Turning," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 108, pp. 215-222, 1986.
5. M. Tomizuka and S. Zhang, "Modeling and Conventional/Adaptive PI Control of a Lathe Cutting Process," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 110, pp. 350-354, 1988.
6. B.S. Chen and Y.F. Chang, "Constant Turning Force Adaptive Controller Design," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 111, pp. 125-132, 1989.
7. R. Toutant, S. Balakrishnan, S. Onyshko, and N. Popplewell, "Feedrate Compensation for Constant Cutting Force Turning," *IEEE Control Systems*, pp. 44-47, 1993.
8. 김태용, "견실한 적응제어기를 이용한 절삭력 제어에 관한 연구", 서울대학교 공학박사학위논문, 1995.
9. V.I. Utkin, "Variable Structure Systems with Sliding Modes," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. AC-22, No. 2, pp. 212-222, 1977.
10. J.Y. Hung, W. Gao, and J.C. Hung, "Variable Structure Control: A Survey," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 40, No. 1, pp. 2-22, 1993.
11. Y.F. Chang and B.S. Chen, "The VSS Controller Design and Implementation for the Constant Turning Force Adaptive Control System," *International Journal of Machine Tools Manufacture*, Vol. 28, No. 4, pp. 373-387, 1988.
12. X.N. Luo and Q. Zhang, "Sliding Mode Controller for Force Constrained Cutting Process," *Proceedings of American Control Conference*, pp. 1121-1126, 1990.
13. J.J. Slotine, "Sliding Controller Design for Non-linear Systems," *International Journal of Control*, Vol. 40, No. 2, pp. 421-434, 1984.
14. J.J. Slotine and W. Li, *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall, 1991.