

2자유도 제어를 이용한 CNC볼엔드밀링 공정에서 절삭력과 위치의 동시제어

Simultaneous Control of Cutting Force and Position Using Two Degree-of-Freedom Controller in CNC Ball-end Milling Process

양호석*, 심영복*(송실대 대학원 기계공학과), 이건복**(송실대 기계공학과)
H. S. Yang, Y. B. Shim(Mech. Eng. Dept., Soongsil), G. B. Lee(Mech. Eng. Dept., Soongsil)

ABSTRACT : There are two important variables in machining process control, which are feed and cutting speed. In this work, a two degree-of-freedom controller is designed and implemented to achieve on-line cutting force control and position control based on the modelling of cutting process dynamics which are established through step response test. Two schemes are proposed and implemented. The first is feed control under the constant spindle speed and spindle speed control under the constant feed speed. The second is a simultaneous control of feed and spindle speed. The last performs a position control under the constant cutting force. Those are confirmed to work properly. Especially the latter shows a faster response.

Key Words : Cutting Force Control, Cutting Process Dynamics, Feed Speed Control, spindle Speed Control, Two Degree-of Freedom Controller.

1. 서론

공작기계를 이용한 절삭공정의 생산성 및 신뢰성 향상을 위해서 CNC공작기계의 보급이 급속하게 확산되어 왔다. 이러한 CNC 공작기계에서 고속, 고강성 가공의 실현을 위하여 절삭 중에 일정한 절삭력을 유지하는 것이 바람직하다. 과도한 절삭력은 공구파손, 마모, 가공정도 저하, 공

구수명 단축, 채터 등 여러 가지 문제를 야기시키고 특히 고속가공 시에는 공작기계의 동특성을 저하시기 때문에 절삭조건과 절삭 동특성의 변화에 능동적으로 대처할 수 있는 제어방식의 개발을 필요로 한다. 최근 들어 이러한 문제를 해결하기 위해서 진보된 하드웨어 및 소프트웨어 기술과의 결합을 통하여 절삭공정에 적응제어 이론을 적용하여 온라인으로 모델변수를 추정하고 적절한 절삭조건을 조정함으로써 일정한 절삭력을 제어하는 연구를 활발히 수행하고 있다.

80년대 초부터 절삭력 추종제어와 공구위치 추종제어의 두 방향으로 연구가 진행되어 왔다. Lee⁽¹⁾는 드릴의 기하학적 형상을 고려하여 드릴 공정의 모델을 개발하고 드릴의 위치에 따라 변화하는 기준 절삭력을 추종하도록 하는 선형 모델 추종제어(Linear Model Following Control)을 수행하였으며, 이⁽²⁾는 이송 및 주축속도 가변에 의한 절삭력 제어를 수행하였고, 이⁽³⁾는 CNC 머시닝센터를 이용한 밀링가공에 있어서 형상가공, 절삭력 및 윤곽오차 최소화의 동시제어를 수행하는 통합제어 알고리즘 개발을 연구하였다. 또, 임⁽⁴⁾은 볼엔드밀 절삭공정에서 다입력 다출력 모델에 의한 절삭력 동시제어를 수행하였으며, 김⁽⁵⁾은 밀링공정에서 외란관측기 설계를 통한 일정절삭력 강인제어를 수행하였다. 또한, Rober⁽⁶⁾는 밀링공정에서 확장된 기준모델 적응제어 기법(Entended Model Reference Adaptive Control)을 이용한 절삭력 제어를 수행하였고, Landers⁽⁷⁾는 1차의 절삭력 공정을 통한 모델에 근거한 절삭력 제어를 수행하였다. 본 연구에서는 다입력 다출력 제어이론(MIMO Control Theory)을 적용하여 절삭력에 영향을 미치는 두 개의 제어변수인 주

축속도와 이송속도를 동시에 변화시키면서 절삭력과 위치제어를 동시에 수행함으로써 응답성의 향상을 피하고 향후 2축 위치제어와의 결합을 통한 형상가공과 절삭력 제어라는 두 가지 다른 특성을 동시에 달성하고자한다.

2. 시스템 모델링

2.1 절삭 공정의 동적 모델

본 연구에서 절삭공정의 동적 모델링은 다음과 같은 두 가지 경우에 대해서 동적 모델링을 수행하였다. 즉,

- ① 주축회전속도 변화에 의한 동적 응답
- ② 이송속도 변화에 의한 동적 응답으로 주축 및 이송모터 구동 드라이버와 모터, 신호처리 부분, 절삭 공정이 모두 일체화된 시스템에 대해서 계단입력 신호(Step Input Signal)를 가하여 그 응답으로부터 1차 지연형 시스템으로 모델링 하였다.

본 절삭공정의 실험을 위하여 CNC머시닝센터를 사용했으며, 이송장치로는 머시닝센터의 베드를 이용하지 않고 AC서보 모터에 의해 구동되는 X-Y테이블을 사용하였다. 모든 구동신호를 컴퓨터에 의해 제어하기 위하여 기존 머시닝센터의 NC 프로그램 제어용 Control Box를 차단하고 Fig. 2.1과 같이 컴퓨터와 데이터획득보드를 통하여 주축의 직류모터드라이버와 X-Y테이블의 AC서보모터드라이버, 공구동력계로부터 얻은 절삭력 데이터를 신호처리 하여 전체적으로 폐루프 구조를 이루도록 하였다.

밀링 가공시 실제 절삭력은 Fig. 2.2에서 보는 것과 같이 정상상태에서도 날의 수와 주축속도에 관계되는 신호주파수를 기본주파수로 하여 재료의 재질, 공구의 마모정도와 가공시 응력, 고온에 의한 소성변형 등에 의한 절삭력 변동으로 기본주파수에 많은 고조파 성분을 포함하고 있기 때문에 이러한 실제 절삭력 신호를 제어하기보다는 기초 절삭력 신호를 신호처리한 평균 절삭력 신호로서 제어를 수행하였다. Fig. 2.3는 절삭과정에서 정상상태의 실제 절삭력을 직접 제작한 저역 필터와 디지털 필터로서 신호처리한 평균 절삭력을 보여 주고 있다.

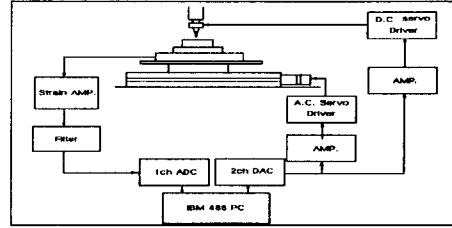


Fig. 2.1 Schematic Diagram for Data Acquisition and Control

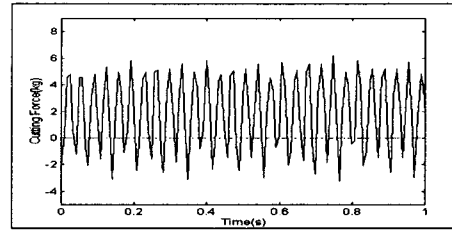


Fig. 2.2 Raw Cutting Force Signal in Milling

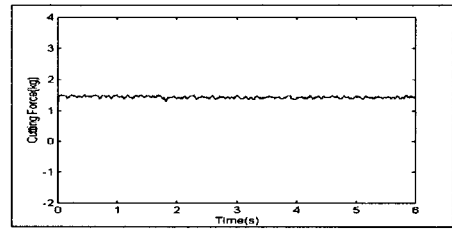


Fig. 2.3 Averaged Cutting Force Signal in Milling Process

2.1.1 이송속도 일정 - 주축속도 제어

주축회전속도의 가변에 의한 절삭력 제어 모델링은 Fig. 2.4에서처럼 이송속도를 일정하게 유지한 채 주축회전 구동드라이버에 계단입력 신호를 가하여 그에 대한 절삭력 변화를 출력으로 하여 모델링 하였다. Fig. 2.5는 주축회전 속도 변화에 대한 절삭력 변화의 스텝응답을 나타내고 있으며, 대체로 일차계의 특성을 나타내고 있다. 시스템의 모델은 Fig. 2.4로부터 다음과 같이 1차계로 모델링 하였다.

$$P_s(s) = \frac{K_s}{\tau_s s + 1} \quad (2.1)$$

Fig. 2.6, 2.7은 이송속도를 일정하게 유지하였을 때 주축회전 속도에 대한 입력과 절삭력의 관계를 보여 주고 있다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 입력이 커짐에 따라 절삭력은 작아지는 것을

알 수 있다. 그러므로 식(2.2.1)의 K_s 는 음의 값을 가지고, 또한 주축회전 속도에 따라 K_s 의 값도 일정하지 않고 조금씩 변하고 있는 것을 볼 수 있다.

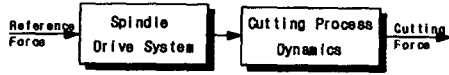


Fig. 2.4 Block Diagram with Constant Feed Velocity

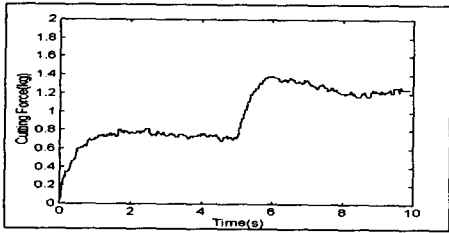


Fig. 2.5 Average Cutting Force Signal due to Step Change in Spindle Speed Under Constant Feed Speed

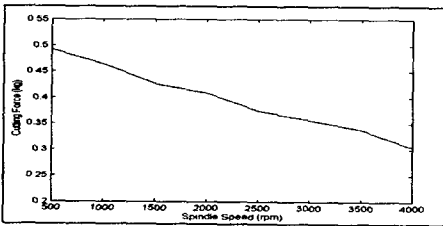


Fig. 2.6 Spindle Speed versus Cutting Force under 0.01m/s Feed

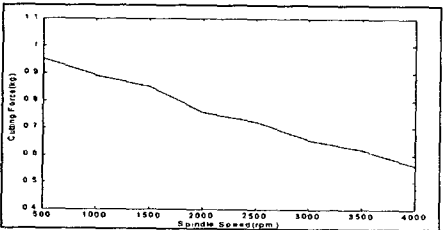


Fig. 2.7 Spindle Speed versus Cutting Force under 0.02m/s Feed

2.1.2 주축속도 일정 - 이송속도 제어

이송속도의 변화에 의한 절삭력 제어 모델링 또한 주축속도에 의한 모델링과 같이 Fig. 2.8에 서처럼 주축회전 속도를 일정하게 유지한 채 절삭공정의 이송을 공급하는 X-Y테이블의 이송모터 구동드라이버에 계단입력 신호를 가하여 그에 대한 절삭력 변화를 출력으로 하여 모델링 하였

다. Fig. 2.9는 이송속도 변화에 대한 절삭력 변화의 스텝응답을 나타내고 있으며 대체로 일차계의 동특성을 나타내고 있다. 시스템의 모델은 Fig. 2.9로부터 다음과 같이 1차계로 모델링 하였다.

$$P_f(s) = \frac{K_f}{\tau_f s + 1} \quad (2.2)$$

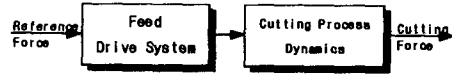


Fig. 2.8 Block Diagram with Constant Spindle Speed

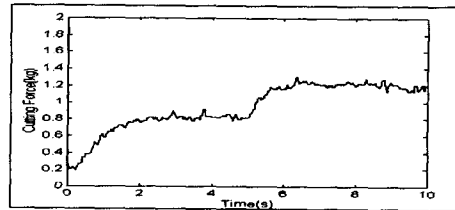


Fig. 2.9 Average Cutting Force Signal due to Step Change in Feed under Constant Spindle Speed

2.2 위치제어 모델

주축 및 이송모터 구동 드라이버와 모터, 신호처리 부분, 절삭 공정이 모두 일체화된 시스템에 대해서만 동적 실험을 통하여 모델링을 수행하였다. 실제 시스템은 고차의 동특성을 나타내고 있으나 근사적으로 다음과 같이 2차지연형과 1차지연형 또는 0차형으로 모델링을 수행하였고 실험결과 근사적으로 구한 2차 및 1차 지연형 모델의 스텝응답을 Fig. 2.10에 보였다.

2차지연형

$$G_x(s) = G_y(s) \cong \frac{K_v \omega_n^2}{s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2}$$

$$K_v = 4.5, \omega_n = 6389.5(\text{rad/sec}), \xi = 0.5731$$

1차 지연형

$$G_x(s) = G_y(s) \cong \frac{K_v}{\tau_v s + 1}$$

$$\tau_v = 0.0003$$

0차형

$$K_v$$

이상과 같은 논의에 의해 주축 및 이송속도의 동시제어에 의한 절삭력과 위치에 대한 전달함수

모델은 다음과 같다.

$$P = \begin{bmatrix} \frac{k_f}{\tau_f s + 1} & \frac{k_s}{\tau_s s + 1} \\ \frac{k_v}{s} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

위의 제어대상 플랜트 모델에서 이송모터 드라이브 입력과 이송속도와의 전달함수는 이송테이블의 시정수가 절삭력 모델의 시정수에 비해 매우 작기 때문에 0차로 모델링 하였다.

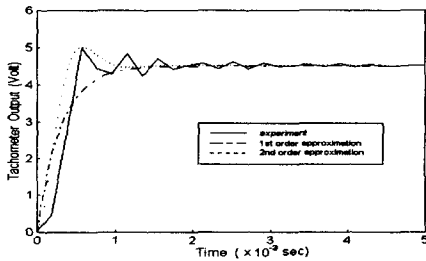


Fig. 2.10 Experimental Velocity Loop Response to 1 Volt Step Input of Verf and Its Approximated Model Response

3. 제어기 설계

3.1 개요

본 장에서는 앞에서 도출된 구동 드라이버의 인가전압을 입력으로 하고 절삭력을 출력으로 한 입출력 모델을 근거로 하여 불엔드밀 가공시의 위치와 절삭력을 추종하는 제어기를 설계한다. 본 연구에서는 주축모터와 이송모터의 제어를 통한 절삭속도와 이송속도의 동시제어를 달성하기 위하여 기준입력 신호와 출력신호 정보를 독립적으로 이용하여 제어입력을 산출하는 2자유도 제어방식을 적용하였다.

3.2 2자유도시스템

2자유도 시스템은 목표치 입력에 대한 추종성능과 외란제거 능력의 피드백 특성을 독립적으로 달성할 수 있다는 장점이 있다. Fig.3.1은 절삭력과 위치의 동시제어 블록다이어그램을 나타내며 Fig.3.2는 이를 일반화한 2자유도 제어시스템 구조의 블록다이어그램 이다. 그림으로부터

$$y_1 = [C_1 \ C_2] \begin{bmatrix} r \\ u_1 - y_2 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

로 표현된다. P와 C₂를 좌,우 기약분해하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = N_p D_p^{-1} = \tilde{D}_p^{-1} \tilde{N}_p \quad (3.2-a)$$

Bezout Identity

$$X N_p + Y D_p = I, \tilde{N}_p \tilde{X} + \tilde{D}_p \tilde{Y} = I \quad (3.2-b)$$

$$C_2 = \tilde{D}_{c2}^{-1} \tilde{N}_{c2} = N_{c2} D_{c2}^{-1} \quad (3.2-c)$$

이때 2자유도 시스템의 안정성이 보장되는 조건은 다음과 같다.⁽⁸⁾

$$C_2 \in S(P, C) \quad (3.3-a)$$

$$\tilde{D}_{c2} C_1 \in m(R_u(s)) \quad (3.3-b)$$

1자유도 시스템으로부터

$$C_2 = (Y - R N_p)^{-1} (X + R \tilde{D}_p)$$

로 좌 기약분해 되기 때문에 $\tilde{D}_{c2} = Y - R N_p$ 로 택하고 $\tilde{D}_{c2} C_1 = F$ 로 놓으면

$$\begin{aligned} C_1 &= (Y - R N_p)^{-1} F, \forall F \in m(R_u(s)) \\ &= (Y - R N_p)^{-1} \left\{ (Y - R N_p) D_p + (X - R D_p) N_p \right\} F \\ &= (D_p + C_2 N_p) F \end{aligned} \quad (3.4)$$

식 3.4를 이용하여 Fig.3.2의 2자유도 시스템 구조를 실제로 적용하기 용이한 구조로 변형하면 Fig.3.3과 같이 나타낼 수 있다. 또한 기준입력 r에서 y₂까지의 전달행렬 G_{y_{2r}}, 외란 u₁으로부터 출력 y₂까지의 전달행렬 G_{y_{2u1}}, 외란 u₂로부터 감도전달행렬 S, 상보감도전달행렬 T는 각각 다음과 같다.

$$G_{y_2r} = N_p F \quad (3.5-a)$$

$$G_{y_2d1} = (\tilde{Y} - N_p R) \tilde{N}_p \quad (3.5-b)$$

$$S = (\tilde{Y} - N_p R) \tilde{D}_p \quad (3.5-c)$$

$$T = N_p (X + R \tilde{D}_p) \quad (3.5-d)$$

$$F, R \in m(R_u(s))$$

기준 모델을 G_M이라 하면 식(3.5-a)로부터 F를 구할 수 있으며 시스템을 안정화하는 피드백 제어기는 C₂ ∈ S(P, C)이므로 이 두 관계로부터 목표

치 추종 성능과 로버스트 성능을 독립적으로 만족시키는 C_1, C_2 를 구할 수 있다.

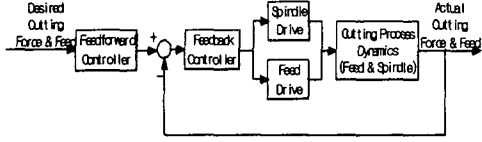


Fig. 3.1 Control System Structure for Simultaneous Control of Spindle Speed and Feed Speed

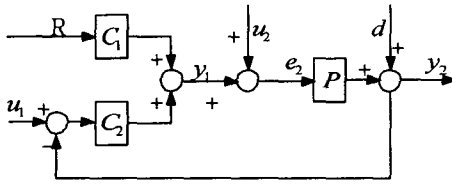


Fig. 3.2 Two-Parameter Control System

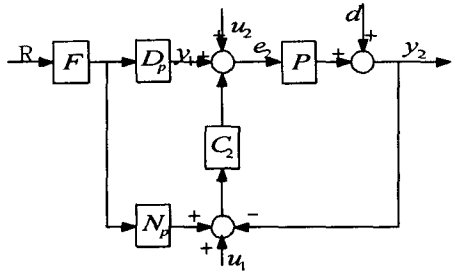


Fig. 3.3 Modified Two-Parameter Control System

3.3 위치통합제어

통합제어 시스템의 블록다이어그램을 Fig. 3.4에 나타내고 있으며 목표 추종성을 달성키 위해 기준 목표치 모델 G_M 은 다음과 같이 2차 시스템으로 선정한다.

$$G_M(s) = \frac{1}{(\tau_m s + 1)^2}, \quad \tau_m < \tau_f \text{와 } \tau_s \quad (3.6)$$

기준입력과 출력과의 전달함수 $G_{y2r} = N_p F$ 로부터 $G_{y2r} = G_M$ 이 되어야 하므로 $N_p F = G_M$ 으로부터 Fig. 3.3의 Feedforward 전달함수 $F = N_p^{-1} G_M$ 를 구한다. 또한 가상적 기준 추종입력을 $r = G_R r_0$ 로 나타내고 $G_R = \tilde{D}_R^{-1} \tilde{N}_R$ 로 기약분해한 후 \tilde{D}_R 의

최대 불변인자를 α_R 로 나타내면 제어기 C_2 는 기준입력에 대한 로버스트성을 갖도록 하기 위해 P/α_R 를 안정화 하도록 설계되어야 한다. 새로운 플랜트를 $P/\alpha_R = N_1 D_1^{-1} = \tilde{D}_1^{-1} \tilde{N}_1$ 로 기약분해하고 앞의 Bezout 방정식을 이용하면 제어기 C_2 는

$$C_2 = (\tilde{X} + D_1 Q) (\tilde{Y} - N_1 Q)^{-1} \quad (3.7)$$

로 표현되며 여기서 Q는 안정한 전달함수 행렬로서 적절한 목표성능을 나타내도록 선택한다. 앞 절에서 실험적으로 획득한 플랜트 모델은

$$P = \begin{bmatrix} \frac{1}{0.6s+1} & -\frac{1}{-0.8s+1} \\ \frac{4.5}{s} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

이며 가상적 기준추종입력의 모델은

$$G_R = \begin{bmatrix} 1 \\ s \\ \frac{1}{s^2} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

로 선택하였다. 따라서 최대불변인자는

$$\alpha_R = \frac{s^2}{(s+1)^2}$$

이 된다.

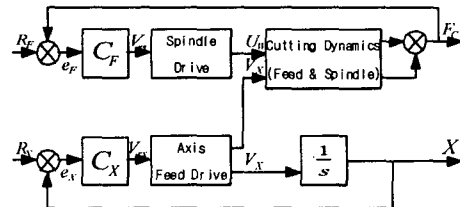


Fig. 3.4 Integrated System Structure for Simultaneous Control of Cutting Force and Position

4. 시뮬레이션

앞에서 확립한 플랜트 모델과 설계된 제어기를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며 진동 및 측정잡음을 고려하여 화이트노이즈가 작용하도록 하였다. 기준추종입력 $r(t)$ 는 Fig. 4.1과 같으며 2자유도 제어기를 사용하여 제어한 결과를 Fig. 4.2에 나타냈다. 그림에서 보듯이 2자유도의 제어기를 사용해서 제어를 수행한 결과 노이즈의 영

항이 있음에도 기준입력을 훌륭히 추종하고 있음을 볼 수 있다. 또한 Fig. 4.3은 임펄스 외란이 존재하는 경우의 제어결과를 보여주고 있으며 Fig.4.4는 스텝 외란이 존재하는 경우의 제어결과를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 외란이 가해지는 순간의 출력변화만 보여주고 있을뿐 바로 제어입력을 추종함을 알 수 있다. Fig. 4.5는 플랜트 모델링 오차가 존재하는 경우의 출력 결과를 나타내고 있으며 플랜트 자체의 불확실한 모델링 오차가 존재함에도 출력이 거의 근사하게 제어입력을 추종하고 있다.

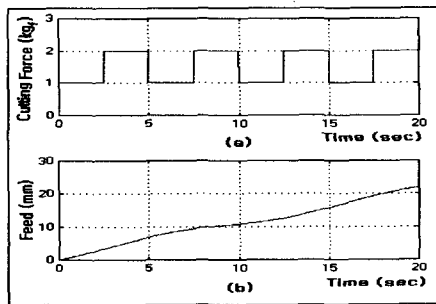


Fig. 4.1 Desired Cutting Force and Feed

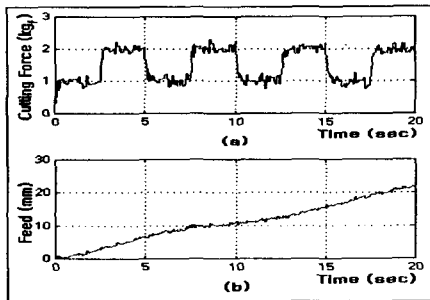


Fig. 4.2 Controlled Cutting Force and Feed using Two Degree-of-Freedom Controller

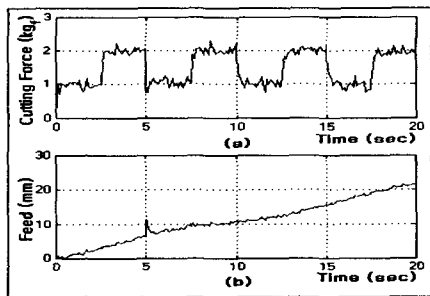


Fig.4.3 Controlled Cutting Force and Feed with Impulse Disturbance at 5 sec

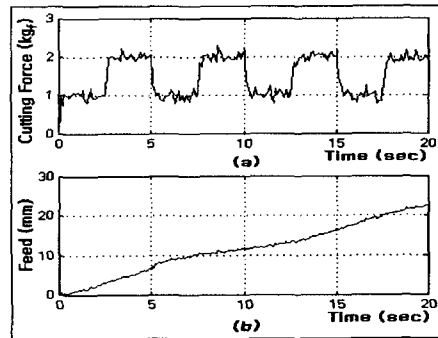


Fig.4.4 Controlled Cutting Force and Feed with Step Disturbance at 5 sec

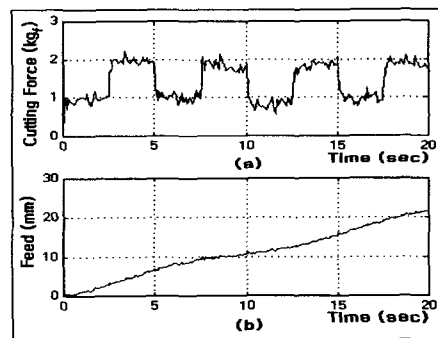


Fig.4.5 Controlled Cutting Force and Feed with Plant Modelling Error

5. 결론

본 연구에서는 밀링 절삭공정에서 절삭조건이나 절삭 동특성의 변화에도 일정한 절삭력을 유지하면서 절삭가공을 수행하여 지령된 위치로 공작물의 이송을 수행하도록 제어기를 설계하여 시뮬레이션을 수행하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 제시할 수 있다.

첫째, 절삭력을 저역 필터를 사용함으로써 절삭동력학 모델링을 단순화하였고, 이러한 모델로서 양호한 절삭력 제어를 수행할 수 있었다. 둘째, 이송속도제어 뿐만 아니라 주축회전 속도를 가변 함으로서 절삭력 제어를 수행할 수 있다. 셋째, 이송속도와 주축회전속도를 동시에 가변시키면서 제어를 수행하여 절삭력과 위치를 동시에 제어할 수 있음을 보였다. 넷째, 절삭가공시 절삭조건과 절삭 동특성이 변하더라도 제어를 수행함으로써 절삭력의 급격한 변화 없이 원활한

가공을 할 수 있음을 보였고, 아울러 모델링 오차를 포함하고 있는 불확실한 모델에 대해서도 강인한 제어가 될 수 있도록 연구가 계속적으로 진행되어야겠다.

참고문헌

1. Gun Bok, Lee, "Digital Control for Burr Minimization in Drilling", Ph. D. Dissertation, Univ. of California, Berkeley, 1989
2. 이천환, 이승욱, 이진복, "이송 및 주축속도 가변속에 의한 블엔드밀 절삭공정의 추적제어", 한국정밀공학회 논문집, 제10권 제4호, pp. 73~80, 1993
3. 이진복, "CNC 머시닝센터를 이용한 밀링 가공에 있어서 형상가공, 절삭력 및 윤곽오차 최소화 의 동시제어를 수행하는 통합제어 알고리즘", 한국과학재단(KOSEF), 1997.4
4. 임동희, "블엔드밀 절삭공정에서 다입력 다출력 모델에 의한 절삭력 동시제어", 석사학위논문, 숭실대 대학원, 2000
5. 김승철, 한동엽, 정성종, "밀링 공정에서의 외란 관측기 설계를 통한 일정절삭력 강인제어", 한국정밀공학회 추계학술대회논문집 pp. 1252~1254, 1998
6. S. J. Rober, "Control of Cutting Force for End Milling Processes Using an Extended Model Reference Adaptive Control Scheme, J. of Science and Eng. ,Aug. 1996
7. Robert G. Landers, "Model-Based Machining Force Control", J of Dynamic System, Measurement and Control. ASME, vol. 122/521, Sep., 2000
8. Vidyasagar, M., Control System Synthesis, A Factorization Approach, The MIT Press, 1985
9. 前田肇 著, システム 制御工學