

전류감시를 이용한 밀링공정에서의 절삭력적응제어시스템 Adaptive force regulation system in the milling process by current monitoring

안동철, 박영진(한양대 대학원), 정성중(한양대 공대)

D.C. Ahn, Y.J. Park(Graduate School, Hanyang Univ), S.C. Chung(Hangyang Univ)

ABSTRACT

In order to regulate the cutting force at a desired level during peripheral end milling processes, a feedrate override Adaptive Control Constant system was developed. This paper presents an explicit pole-assignment PI-control law through spindle motor current monitoring and its application to cutting force regulation for feedrate optimization.

An experimental set-up is constructed for the commercial CNC machining center without any major changes of the structure. A data transfer system is constructed with standard interface between an IBM compatible PC and a CNC of the machining center. Experimental results show the validity of the system.

Key Words : Spindle Motor Current (주축 모터전류), Feedrate Override (이송속도 제어), Adaptive Control Constraint(ACC : 구속적응제어), Pole-assignment (극점배치), Mean Value of Cutting Force (평균절삭력)

1. 서론

CNC의 고기능화 및 지능화를 위하여서는 절삭력의 측정은 필수적이다. 절삭력 측정을 위해 공구동력계를 사용하여 왔지만 실제로 공구동력계를 사용하는 경우에는 비용과 설치상의 문제등으로 인한 제약이 뒤따르며, 절삭행정의 제한을 받을 뿐만 아니라 절삭유를 급유하지 못하는 등의 여러 가지 어려움이 있다. 따라서 공구동력계를 사용하지 않고, 실제 산업에 적용가능한 절삭력 감시 시스템에 대한 연구가 필요한 실정이다.

주축모터 및 이송모터전류 감시를 통한 절삭력의 측정은 직류모터를 대상으로 하여 최근에 많은 연구가 행해져 왔으나, 주로 공구마모 및 파괴 감시를 위한 실시간 이상 진단에 대한 연구 분야에서 수행되어져 왔다.

Stein등은 선삭시 주축 교류 유도모터의 전력을 감시하여 절삭력을 간접적으로 측정하였고^[1], 간접 절삭력 센서로써 직류서보모터를 평가^[2]하였다. Altintas^[3] 등은 밀링공정에서 직류 이송 서보모터의 전류를 감시하여, 이송 서보계의 대역폭안에서 절삭력을 간접적으로 측정할 수 있음을 보였으며, 공구마모 및 파손예측에 전류신호를 이용하였다. 김태용

^[4]등은 교류 이송서보모터의 전류를 이용하여 절삭력을 추정하고, 이를 적응제어에 응용한 바 있다. 그러나 이송서보모터 전류를 이용해서 절삭력을 추정하기 위해서는 정확한 절삭 메카니즘과 공작기계 이송계의 정밀도에대한 해석이 불가피하기 때문에, 본 논문에서는 절삭력에 가장 민감하게 영향을 받는 주축을 대상으로 연구를 수행하였고 주축모터의 전류와 절삭력과의 관계를 실험을 통하여 규명하였다.

본 논문에서는 실제 널리 사용되고 있는 교류 영구자석 동기형 모터(PMSM, permanent magnet synchronous motor)를 장착한 수평형 머시닝센터로부터, 주축 모터 전류 단자에서 전류를 직접 측정하여 절삭력을 추정하였고, 추정한 절삭력을 머시닝센터의 PMC 인터페이스 및 이송속도 제어를 이용한 일정 절삭력 적응제어에 응용하였다.

2. 절삭력 간접측정 시스템

2.1 절삭력과 주축모터의 전류

본 연구에서는 머시닝센터의 주축모터의 전류를 이용하여 절삭력을 추정하였다. 대상 주축모터인 교류 영구자석 동기형 모터(PMSM)는 전류제어방식의

FWM 증폭기를 사용하고 있으므로, 모터 전류와 모터 토크 사이의 관계식은 다음과 같이 표현된다.

$$T_M = K_t \cdot I_M \quad (1)$$

여기서, T_M : 모터 토크의 순간치

I_M : 모터 전류의 순간치

K_t : 모터의 토크 상수

식(1)의 토크 및 전류는 순간치이므로, 절삭력 측정에 쓰이기 위해서는 한 주기에 대한 시간의 평균치로 환산하여야 한다. 교류 영구자석 동기형 모터에는 120° 의 위상차를 갖는 u, v, w 의 3상 전류가 인가되며, 3상 전류의 순간치를 모두 더하면 그 값은 0이 된다.

$$I_u + I_v + I_w = 0 \quad (2)$$

모터 전류의 최대치를 I 라 하면, 전류의 시간적 평균치인 등가의 직류량은 다음과 같다.

$$I^2 = \frac{2}{3} (I_u^2 + I_v^2 + I_w^2) \quad (3)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{(I_u^2 + I_v^2 + I_w^2)}{3}} \quad (4)$$

전류의 측정은 FANUC 교류 주축 증폭기의 체크 단자(Check terminals)로부터 u 상과 v 상의 전류를 측정하고^[5] 식(2)에 의해서 w 상의 전류는 식(5)와 같이 구할 수 있다.

$$I_w = - (I_u + I_v) \quad (5)$$

주축계의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = J_e \frac{dw}{dt} + Bw + T_f + T_d \quad (6)$$

여기서, J_e = 모터축으로 환산된 등가관성

B = 모터축으로 환산된 점성감쇠

T_f = 모터축으로 환산된 쿨롱마찰 토크

T_e = 모터토크

T_d = 외란토크

점성감쇠 토크와 쿨롱마찰 토크가 절삭토크의 함수가 아니라하면^[6], 이들을 상수 C 로 가정할 수 있다. 그리고 일반적으로 절삭시에는 주축의 속도가 일정하게 유지되므로 식(6)은 식(7)과 같이 간략화 된다.

$$K_t I_{rms} = C + r_t F \quad (7)$$

여기서, F = 절삭력

r_t = 공구반경

식(7)로부터, 주축모터 전류를 측정하면, 절삭력을 추정할 수 있음을 알 수 있다.

2.2 절삭력 간접측정 실험

식(7)의 주축모터의 전류와 절삭력의 선형적 관계를 확인하기 위해, Table 1의 실험조건으로 X축 이송속도와 절삭두께를 각각 달리하면서, 절삭력과 전류신호를 측정하여, 이를 Fig.1에 나타내었다. 실제 적응제어에 응용되는 절삭력은 공구 1회전 동안의 평균절삭력^{[7][8]}이므로, 절삭력과 전류신호는 공구 1회전당 평균치를 구하였다. Fig.1으로부터, 식(7)의 계수를 구하면, 주축모터의 전류와 절삭력은 식(8)과 같은 선형식으로 나타낼 수 있다.

$$F = 1557.75 I_s - 1222.64 \quad (8)$$

여기서, F = 절삭력

I_s = 주축모터전류

Fig.2에, 이송속도 200mm/min일 때, 주축모터 전류를 이용해서 식(8)로부터 예측한 평균절삭력과 공구동력계로 측정된 평균절삭력을 나타내었다. 두 절삭력이 거의 일치하므로, 식(8)에 의해 주축모터 전류로부터 절삭력을 추정할 수 있음을 확인하였다.

Table 1 Experimental Condition for Indirect Cutting Force Measurement

Tool	dia.16mm, 4 flute
Workpiece	SM45C
Depth of cut (mm)	0.5→1→1.5→2→2.5→3
Spindle speed (rpm)	600
Feedrate (mm/min)	150, 200, 250, 300

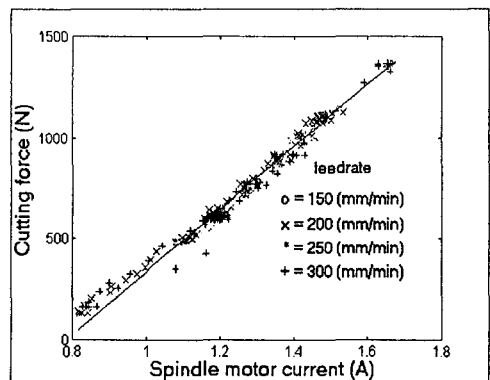


Fig.1 Static characteristics of spindle current & cutting force

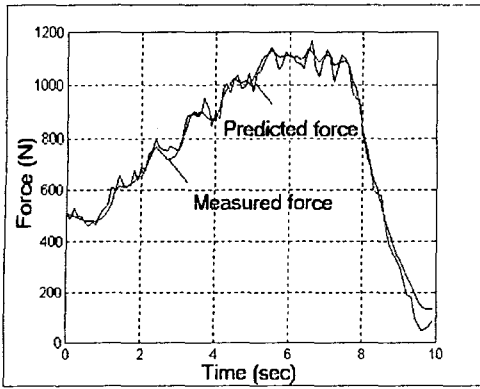


Fig. 2 Predicted & Measured Cutting Force

3. 일정 절삭력 적응제어

기존의 밀링이나 선삭공정에 대한 절삭력 구속적응제어 연구의 대부분은 공작기계 구동부나 기존 NC 장치에 커다란 설계변경을 요구하거나 현실화하기에 복잡한 제어 방법론 등을 사용하는 문제점들을 가지고 있었다^{[10][11]}. 이를 극복하고 실용화하기 위해, 본 연구에서는 극점배치를 이용한 PI 제어기를 갖는 구속적응제어 기법^[8]을 적용하여, PMC 인터페이스를 통해 실시간으로 이송속도를 제어함으로써, 일정절삭력 적응제어를 구현하였다. 구현된 PI 형 적응제어기를 갖는 일정절삭력 적응제어시스템의 블록선도는 Fig.3와 같다.

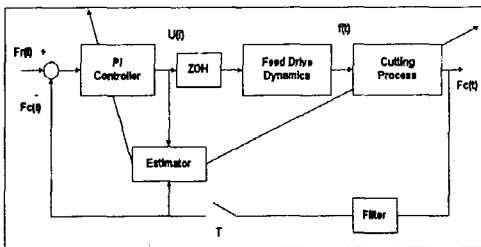


Fig. 3 Block diagram of Cutting Force Regulation System using PI type adaptive controller

머시닝센터상에서 구현된 본 적응제어시스템을 이용하면 공절삭 시간을 감소시킴과 동시에 단위 시간 당의 절삭량을 극대화시킬 수 있고, 과도한 절삭에 의해 생기는 공구마모 및 공구파손 현상을 줄일 수 있어 효율적인 고속 및 고강성 절삭을 실현할 수 있다.

3.1 극점배치 적응제어

측면절삭 엔드밀링시 축방향 절삭깊이가 일정한 경우 공작물에 걸리는 평균 주절삭력 F 는

$$F = K_s d^\alpha f^\beta s^\gamma \quad (9)$$

로 모형화 할 수 있고^[9], 여기서 K_s 는 비절삭지항, d 는 반경방향 절삭깊이, s 는 주축 회전속도, f 는 이송속도 그리고, α, β 및 γ 는 지수인자이다.

절삭력 제어시스템에서 절삭력 오차 $E(i)$ 는

$$E(i) = F_r(i) - F_c(i) \quad (10)$$

로 정의되며 여기서 $F_r(i)$ 는 기준절삭력, $F_c(i)$ 는 실제 A/D 샘플된 절삭력이다.

실제 절삭력과 이송속도와의 관계는 식(9)를 변형하여

$$F_c(i) = (K_s d^\alpha f^{\beta-1} s^\gamma) f = K_c(i) f(i) \quad (11)$$

와 같이 절삭조건에 따라서 변동하는 계수 $K_c(i)$ 를 갖는 선형모델로 간략화된다. A/D 샘플 후 절삭력오차를 제거하기 위해 게인 K_p 와 K_i 그리고 샘플 시간 T 를 갖는 PI 제어기인

$$U(i) = \left[K_p + \frac{K_i T}{1 - z^{-1}} \right] E(i) \quad (12)$$

와, 이송속도 명령의 출력에 필요한 ZOH (Zero Order Hold) 및 공작기계 이송계의 동특성 등을 고려하면, 제어기의 출력과 실제 절삭력사이의 전달함수는

$$\frac{F_c(i)}{U(i)} = K_m K_c \frac{(1 - e^{-T/\tau})z^{-1}}{1 - e^{-T/\tau}z^{-1}} \quad (13)$$

이 된다. 여기서, K_m 은 이송계와 측정장치 게인의 곱, τ 는 이송계의 시정수이다. 샘플시간 T 는 이송계의 시정수 τ 에 비해서 크기 때문에, 식(11), (12), (13)으로부터 기준절삭력과 실제절삭력사이의 전달함수를 구하면 다음과 같이 된다.

$$G(z) = \frac{F_c(i)}{F_r(i)} = \frac{(K_p K_m K_c + T K_i K_m K_c z^{-1} - K_p K_m K_c z^{-2})}{1 + (K_p K_m K_c + T K_i K_m K_c - 1)z^{-1} - K_p K_m K_c z^{-2}} \quad (14)$$

적응제어시스템이 안정성을 유지하기 위해서는 절삭조건에 관계없이 식(14)의 극점 z_1, z_2 가 단위원내에 존재해야 한다. 그러나 제어기 게인 K_p 와 K_i 가 고정된 경우에는, 절삭조건에 따라 시변 절삭공정계수인 K_c 값이 커지게 되면 극점이 변화하기 때문에, 절삭공정에서 불안정한 현상이 야기될 수 있다. 따라서 절삭조건에 상관없이 안정성을 확보하기 위하여, 절삭조건에 따라 실시간으로 K_c 값을 추정하고, 이를 이용하여 식(14)와 같이 제어기의 계

인들을 변화시켰다.

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= z_2 \\ K_p^e(z) &= \frac{-z_1 z_2}{K_m K_c^e(z)} \\ K_i^e(z) &= \frac{1 - (z_1 + z_2) + z_1 z_2}{T K_m K_c^e(z)} \end{aligned} \right\} (14)$$

3.2 실험장치의 구성

Fig.4에 본 연구에 사용된 실험장치 및 그의 구성을 나타내었다.

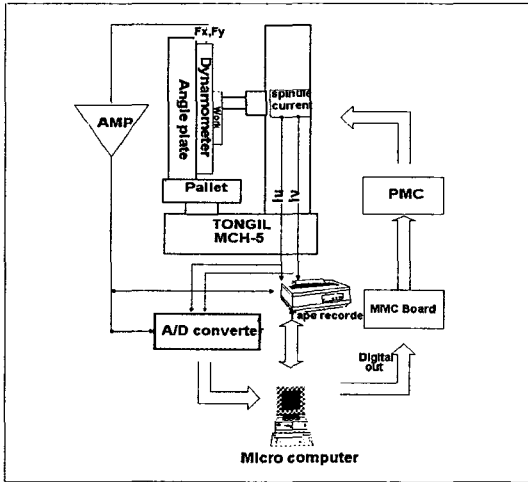


Fig. 4 Schematic diagram of experimental set-up

먼저, 공구동력계의 절삭력 신호와 주축모터로부터 출력되는 전류신호를 A/D Converter를 통해서 FC에 저장하고, 이들 사이의 관계를 유도하였다.

실제 적응제어 시에는, 주축모터 전류만을 사용하여 절삭력을 추정한 후, 이를 이용하여 제어법칙에 따라 이송속도 명령이 출력된다. 출력된 제어명령은 MMC Board^[8]를 통해 머시닝센터의 PMC로 전달이 되어, 이송속도 override를 조절함으로써 일정절삭력 제어가 이루어진다. 일련의 모든 신호는 향후 연구를 위해 Tape Recorder에 저장하였다.

본 연구에서 사용된 NC 제어기인 FANUC 15M의 경우 이송속도 Override는 입력한 공칭 이송속도의 0~255% 내에서 1% 씩 Override가 가능하므로, 비교적 정확한 제어가 가능하다.

3.3. 실험 결과

Table 2의 실험조건으로, 공작물의 형상이 계단형

과 경사형일 때, 주축모터 전류를 이용한 일정절삭력 적응제어 결과를 Fig.5와 Fig.6에 각각 나타내었다. 이 경우 적응제어시스템의 극점은 $z_1=0.001$, $z_2=-0.001$ 이다.

초기 공절삭시 이송속도는 500 mm/min로 제어되어 생산성 증대 효과를 볼 수 있으며 경절삭 또는 과절삭 구분 없이 공칭이송속도 200 mm/min의 1% 분해능으로, 이송속도 Override 제어범위 내에서 800 N 일정절삭력 제어가 잘 이루어지는 것을 볼 수 있다.

Table 2 Experimental Condition for ACC

	Depth of Cut (mm)	Spindle Speed (rpm)	Nominal Feedrate (mm/min)	Work-piece	Tool
CASE I	2,3,4	600	200	SM45C	dia.16mm 4 flute
CASE II	2~4	600	200	SM45C	dia.16mm 4 flute

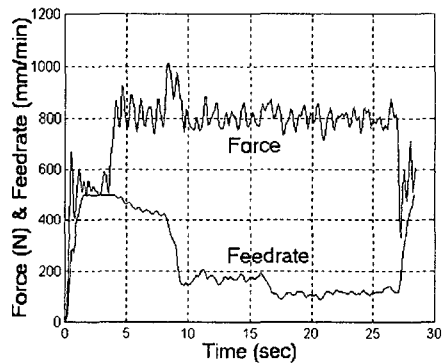
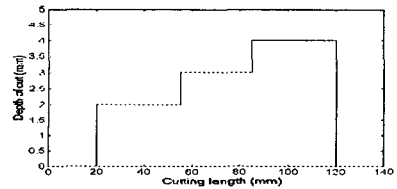


Fig. 5 PI adaptive control (Case I)

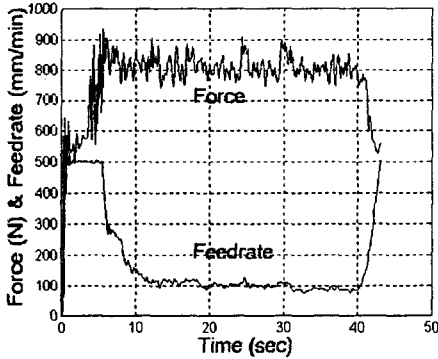
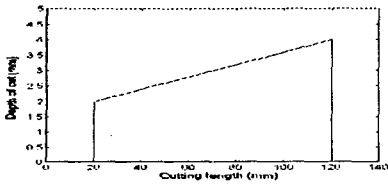


Fig. 6 PI adaptive control (Case II)

4. 결론

- (1) 공구동력계를 사용하지 않고, 머시닝센터의 AC 주축모터 전류 감시를 통해 절삭력을 추정하였다.
- (2) 일정절삭력 구속적용제어법을 FANUC 15M을 갖는 수평형 머시닝센터의 측면 엔드밀링 공정에 적용하여, 가공조건의 급격한 변화에도 이송속도 Override를 이용하여 평균 주절삭력을 일정하게 유지할 수 있는 시스템을 실현하였다.
- (3) 동작기계 구동부와 NC 제어기의 설계변경 없이 이송속도 Override를 이용한 적응제어를 구현할 수 있도록 PMC 인터페이스 기법을 적용하였다.
- (4) 실험을 통하여 구속적용제어기법의 타당성을 검증하였으며, 이 시스템을 이용함으로써 공절삭 시간의 단축은 물론 과도절삭에서 오는 공구마모 및 파손을 줄일 수 있다.
- (5) 기존의 상용화된 머시닝센터, CNC의 구조를 변경하지 않고 실험장치를 구성하여, 절삭력 적응제어를 수행함으로써 절삭력 적응제어 실용화의 기초를 마련하였다.

5.참고문헌

- [1] Stein, J.L., and Wang, C.H., 1990, "Analysis of Power Monitoring on AC Induction Drive Systems," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol.112, pp.239-248
- [2] J.L. Stein, 1986, "Evaluation of DC Servo Machine Tool Feed Drives as Force Sensors", ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, vol.108, pp279-288
- [3] Y.Altintas, 1992, " Prediction of Cutting Force and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurement", ASME Journal of Engineering for Industry, vol.114, pp386-392
- [4] 김태용, 최덕기, 주종남, 김종원, "이송모터 전류 감지를 통한 절삭력의 간접측정과 절삭공정 감시 및 제어에의 응용", 한국정밀공학회지, 제 13 권, 제 2 호, pp.133~145
- [5] FANUC, 1992, SERVO AMPLIFIER FANUC Operation Manual, Japan, Tokyo
- [6] Stein,J.L. and Shin,K.C., 1986, "Current Monitoring on Field Controlled DC Spindle Drives," ASME Journal of Dynamic Systems Measumt and Control, vol.108, No., pp.289~295.
- [7] I. Yellowley, 1985, "Observations of the Mean Values of Forces, Torque and Specific Power in the Peripheral Milling Process", International Journal of Machine Tool Design and Research, Vol. 25, No. 4, pp. 337-346.
- [8] 정성중, 1996, "엔드밀링 공정에서 극점배치 구속적용제어시스템", 한국공작기계학회지, 제 5 권, 제 2호, pp.63~72
- [9] S.Smith and J. Tlusty, 1991, "An overview of Modeling and Simulation of the Milling Process", Journal of Engineering for Industry, vol.113, No.2, pp.169~175
- [10] A.Spence, Y. Altintas, 1991,"CAD Assisted Adaptive Control for Milling",ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol.113, No.3,pp.444~450
- [11] K.Danai, A. G. Ulsoy, 1987, "A Dynamic State Model for On-Line Tool Wear Estimation in Turning", ASME Journal Engineering for Industry, Vol.109, No.4, pp.396~403.