

절삭 공정의 2축 적응제어 Adaptive Cutting Force Control of 2Axes

조광섭*, 우중원*, 김종원**

Kwang-Seop Cho*, Joongwon Woo*, Jongwon Kim**

* 서울대 기계설계학과 대학원

** 서울대 기계설계학과

ABSTRACT

This paper presents adaptive cutting force control in milling process using indirect cutting force measurement. The cutting forces in X, Y, and Z axes are measured indirectly from the sensing current of the feed-drive servo motor. After modelling the feed-drive system of a horizontal machining center, the relation between the cutting force and the servo motor current is analyzed. The pulsating milling forces are measured from the sensing current within the bandwidth of the servo. It is shown that indirect cutting force measurement can be used in adaptive cutting force control. The adaptive control scheme which is globally convergent and stable is attached to a commercial CNC machining center. Cutting experiments on end milling are performed for diagonal cutting.

Keywords Cutting Force Regulation, Adaptive Control, Milling Process, Diagonal Cutting

1. 서론

최근 들어 CNC 공작기계의 사용이 급격하게 늘어났지만, 여전히 숙련된 프로그래머와 작업자를 필요로 하고 있다. 프로그래머나 작업자는 가공 지침서나 가공 경험에 의존하여 이송속도나 주축 회전수 같은 절삭조건을 결정한다. 따라서 최악의 경우를 고려한 절삭조건이 선정되는 관계로 NC 공작기계를 최대의 출력으로 사용할 수 없게 되어 생산성 저하 요인으로 지적되고 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 절삭력의 고속 적응 제어에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 그 연구 성과들은 Ulsoy와 Koren에 의해 보여 졌다[1]. 이들 연구의 목적은 가공상태에 따라 적절한 절삭조건을 온라인으로 결정하는 것이다. 그러나 Ulsoy와 Koren이 언급했듯이, 기존의 연구들은 절삭력 측정 방법같은 공통적으로 가지고 있는 실용화상의 문제점들 때문에 극소수의 적응제어 이론만이 절삭공정에 적용되어지고 있다.

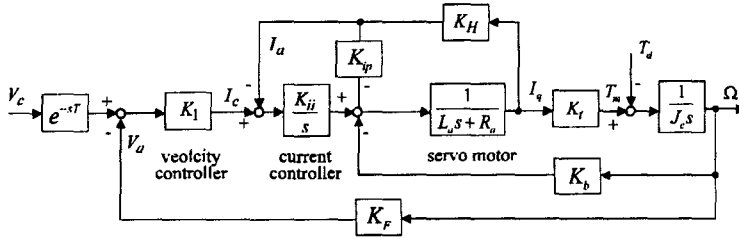
이러한 실용화 상의 문제점들을 해결하기 위하여 본 연구에서는 다음과 같은 방법으로 고속 적응 제어 시스템을 개발하고자 한다.

첫째, 교류 서보모터의 전류를 감지하여 X, Y, 그리고 Z축의 절삭력을 간접 측정한다.

둘째, 극배치 방식의 PID 제어기 구조를 가지는 견실한 적응제어 기법으로 절삭력 제어를 한다.

Stein 등은 선삭공정을 대상으로 직류 이송 모터 전류와 절삭력 사이의 민감도 해석을 하였다[2]. Altintas는 밀링공정의 경우에 대하여 직류 이송 서보모터의 전류를 감지하여 이송서보계의 대역폭안에서 이물림 주파수의 절삭력을 측정할 수 있음을 보였다[3]. 최근 들어 상용화된 CNC는 교류 이송 서보모터를 사용하고 있으므로, 기존의 직류 이송 서보모터에 대한 연구와는 별도로 교류 이송 서보모터를 대상으로 절삭력 간접 측정 방법에 대한 연구가 이루어지고 있다[4].

본 논문은 다음과 같은 순서로 구성되어 있다. 2장에서는 머시닝 센터의 이송서보계를 모델링하고, 이를 통하여 교류 이송 서보모터의 전류와 절삭력



V_c	feedrate command [mm / min]	-	V_a	actual feedrate [mm / min]	-
K_1	velocity proportional gain [V / (mm / min)]	0.08	K_F	velocity feedback gain [(mm / min) / (rad / sec)]	95.493
I_c	current command [V]	-	I_a	feedback current [A]	-
K_{ii}	current integral gain [1 / sec]	6.91	K_{if}	current proportional gain [-]	0.0088
K_{if}	current feedback gain [V / A]	5.93	L_a	armature coil inductance [mH]	1.20
R_a	armature coil resistance [ohms]	0.15	I_a	actual current [A]	-
K_t	torque constant [kgf · m / A]	0.165	K_b	back EMF constant [V / (rad / sec)]	0.38
T_m	motor drive torque [kgf · m]	-	T_d	disturbance torque [kgf · m]	-
J_e	equivalent feed-drive inertia [kgf · m · sec ²]	0.0146	Ω	angular velocity of motor shaft [rad / sec]	-

Fig.1 Block diagram of the FANUC feed-drive system

사이의 관계를 해석하였다. 3 장에서는 절삭력 적응 제어를 위한 전실한 제어기 구조를 제시하고 이를 대각 절삭에 적용한 실험 결과를 4 장에서 보여주고 있다. 마지막으로 5 장은 본 논문의 결론이다.

2. 절삭력 간접 측정 시스템

대상 공작기계는 수평형 머시닝센터로서 제어기는 FANUC CNC 모델 15M이다. X, Y, 및 Z의 각 이송축은 영구자석 동기형 교류 모터(PMSM)에 의하여 직접 구동되어지는 볼 스크류로 구성되어 있다. 이송서보계는 CNC 제조업체인 FANUC의 기술자료를 바탕으로 Fig.1과 같은 블록 선도로 표시될 수 있다[5].

이송서보계에 대하여 이송속도 명령치 v_c 와 실제 이송속도값 v_a 의 전달 함수는 Fig.1의 표에 표시된 값을 대입하여 정리하면 다음과 같은 식이 된다.

$$\frac{v_a(s)}{v_c(s)} = \frac{497000e^{-0.08s}}{(s+14.0)(s^2+155s+35500)} \quad (1)$$

여기서 0.08 sec의 시간 지연 T 가 있는데 이는 CNC의 PMC를 거쳐서 이송속도 명령을 전달하고 있음에 기인하는 것이다. 0 ~ 10 Hz의 주파수 영역에 대하여 식(1)은 다음과 같이 근사시킬 수 있다.

$$\frac{v_a(s)}{v_c(s)} = \frac{14.0e^{-0.08s}}{s+14.0} \quad (2)$$

한편, 이송방향의 절삭력을 입력으로 하고 이송 모터의 전류를 출력으로 하는 절삭력 간접 측정 시

스템의 전달함수는 Fig.1에 의하여 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{K_t i_a(s)}{t_d(s)} = \frac{3570(s+139)}{(s+14.0)(s^2+155s+35500)} \quad (3)$$

여기서 t_d 는 외란 토크 T_d 의 변화량이다. 이때, 전류제어루프의 동특성에 영향을 미치지 않는 극점을 무시하면, 식(3)은 다음과 같이 근사시킬 수 있다.

$$\frac{K_t i_a(s)}{t_d(s)} = \frac{255(s+139)}{s^2+155s+35500} \quad (4)$$

이송 서보계에 대한 모델을 검증하기 위하여 이송계의 모델에서 구한 주파수 응답선도를 실험 결과와 비교하여 Fig.2에 나타내었다. 이로부터 모델과 실험 결과로부터 얻어진 주파수 응답이 서로 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. Fig.2의 주파수 응답 선도로부터 절삭력 간접 측정 시스템의 대역폭은 약 62 Hz임을 알 수 있으며, 따라서 62 Hz의 이물림 주파수내에서 이송모터의 전류를 감지하여 절삭력을 간접적으로 측정하는 것이 가능하다.

이송서보계의 동기회전관성 J_e 를 고려하면 모터 구동 토크 T_m 과 외란 토크 T_d 의 관계는 다음식으로도 나타낼 수 있다.

$$T_m = J_e \frac{d\Omega}{dt} + T_d \quad (5)$$

이때, 외란 토크는 가공중의 절삭력에 의한 토크 T_c 와 이송면에서의 마찰에 의한 토크 T_f 의 합으로서 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

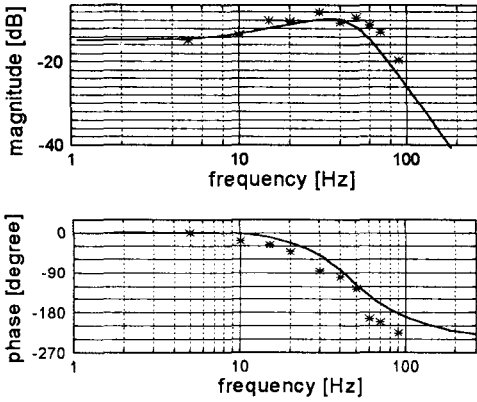


Fig. 2. Frequency response of the feed drive system
 $KtI_q(s) / \tau_d(s)$

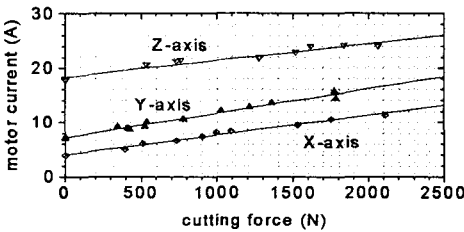


Fig. 3. Static characteristics of the indirect cutting force measurement system

$$T_d = \text{sgn}(\Omega)T_f + T_c \quad (6)$$

한편, PMSM의 경우 모터 구동 토크 T_m 은 등가의 q 축 고정자 전류 I_q 에 비례하므로, 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$T_m = K_f I_q \quad (7)$$

여기서 K_f 는 모터 상수, I_q 는 등가의 q 축 고정자 전류이다.

식(5), 식(6) 과 식(7)에 의하여 정상 상태에서의 절삭력과 이송 모터 전류 사이의 관계는 다음과 같다.

$$K_f I_q \equiv T_d = \text{sgn}(\Omega)T_f + K_f F_c \quad (8)$$

여기서, K_f 는 절삭력과 토크 사이의 비례상수이며, F_c 는 이송방향의 절삭력이다. 반복적인 실험을 통하여 얻은 이송모터의 전류와 절삭력간의 선형적 관계는 다음 식과 같이 표시된다.

$$\text{X-axis: } I_{qx} = 4.12 + 0.00362F_{cx} \quad (9)$$

$$\text{Y-axis: } I_{qy} = 7.24 + 0.00450F_{cy} \quad (10)$$

$$\text{Z-axis: } I_{qz} = 18.5 + 0.00289F_{cz} \quad (11)$$

위의 세 식들은 절삭력 간접 측정 시스템의 정적 특성을 나타내고 있다.

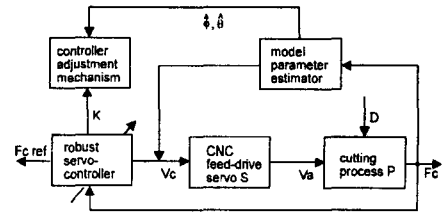


Fig. 4. Basic structure of an adaptive robust servo control for cutting force regulation

이송속도와 이송방향이 일정한 대각 절삭의 경우 가속도에 의한 전류의 동특성이 무시될 수 있으므로, 앞에서 구한 절삭력과 이송 모터 전류 사이의 정적인 비례 관계를 적용할 수 있다[3].

3. 견실한 적응제어기법

온라인으로 모델변수 추정과 제어를 하는 견실한 적응제어 기법은 최근의 연구들에서 제시되어 왔다[4]. 절삭력 제어를 위한 견실한 적응제어기는 (1) 제어대상계, (2) 모델 변수 추정기, (3) 서보 제어기, 그리고 (4) 제어이득 조정장치로 구성된다.

제어대상계는 Fig.4에 나타난 바와 같이 CNC 이송제어계 S와 절삭공정 P로 이루어진다. 제어 목적은 절삭깊이나 절삭소재의 변화에 상관없이 절삭력 F_c 의 최대값을 일정하게 유지시켜 주는 이송속도 명령치를 생성하는 것이다.

제어대상계는 다음의 ARMA 모델의 형태로 표시할 수 있다.

$$f_c(t) + \phi_1 f_c(t-1) + \phi_2 f_c(t-2) = \theta_0 v_c(t-1) + \theta_1 v_c(t-2) \quad (12)$$

여기서 $f_c(t)$, $v_c(t)$ 는 샘플된 데이터 열이다.

위의 제어대상계 모델은 다음과 같은 관측가능 형태로 표시될 수 있다.

$$\begin{cases} x(t+1) = \Phi x(t) + \Gamma v_c(t) \\ f_c(t) = C_m x(t) \end{cases} \quad (13)$$

여기서

$$\begin{aligned} x(t) &\equiv [x_1(t), x_2(t)]^T \\ \Phi &\equiv \begin{bmatrix} 0 & -\phi_2 \\ 1 & -\phi_1 \end{bmatrix}; \Gamma \equiv \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_0 \end{bmatrix} \\ C_m &\equiv [0 \quad 1] \end{aligned} \quad (14)$$

따라서 식(12)는 다음과 같이 간단하게 표현된다.

$$f_c(t) = \Phi_m(t-1)^T \theta_p \quad (15)$$

모델변수 θ_p 는 순환식 최소오차 자승 알고리즘(recursive least square estimation algorithm)을 이용하여

온라인으로 추정하였다[6].

전체 페루프의 극점을 원하는 위치에 배치하고 전체 시스템이 다중 입출력 시스템으로 쉽게 확장하기 위하여 견실한 서보제어기는 서보보상기, 안정화보상기 및 제한제어기로 구성한다[7].

서보보상기의 동적 모드는 기준지령치와 외란의 동적 모드와 일치하게 구성한다. 일정한 값을 가지는 기준절삭력에 대하여 역시 일정한 값을 가지는 외란을 고려하면, 서보보상기는 고전 제어 기법에서 적분기와 같은 형태로 다음과 같이 표시된다.

$$\eta(t+1) = \eta(t) + Te(t); \quad e(t) = f_c(t) - f_c^*(t) \quad (16)$$

여기서, T 는 샘플링 간격이며, f_c^* 는 절삭력 기준 지령치이다.

서보보상기와 제어대상계를 결합한 시스템은 다음과 같은 안정화 보상기로 안정화 시킬 수 있다.

$$\varepsilon(t+1) = \gamma_0\varepsilon(t) + \gamma_1f_c(t) + \gamma_2\eta(t) \quad (17)$$

한편, 제한제어기는

$$v_c(t) = k\eta(t) + \gamma_3f_c(t) + \gamma_4\varepsilon(t) \quad (18)$$

와 같이 구성되며, 제어대상계와 서보보상기, 안정화보상기, 그리고 제한제어기를 결합하여 다음의 페루프 시스템을 얻는다.

$$X(t+1) = \Phi(K)X(t) + \Gamma(K)f_c^*(t) \quad (19)$$

$$f_c(t) = C(K)X(t) \quad (20)$$

여기서

$$X(t) \equiv [x(t), \eta(t), \varepsilon(t)]^T \in R^M \quad (21)$$

$$\Phi(K) \equiv \begin{bmatrix} \Phi + \Gamma\gamma_3C_m & \Gamma k & \Gamma\gamma_4 \\ B_d^*C_m & C_d^* & 0 \\ \gamma_1C_m & \gamma_2 & \gamma_0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\Gamma(K) \equiv \begin{bmatrix} 0 \\ -B_d^* \\ 0 \end{bmatrix}; \quad C(K) = [C_m \quad 0 \quad 0]^T \quad (23)$$

$M=4$ 이고 K 는 제어기 이득 벡터로 다음과 같다.

$$K \equiv [k, \gamma_0, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4] \quad (24)$$

식(19), 식(20)의 페루프 시스템에 대하여 다음과 같은 조건이 만족되면, 추종오차가 없이 제어되고 댐핑계수를 원하는 값으로 지정하는 제어 이득 K 가 항상 존재한다.

- (1) 제어대상계의 모델변수 교란이 Φ 를 불안정하게 하지 않고 Φ 가 항상 점근적으로 안정하다.
- (2) (Φ, Γ) 가 제어가능하고 (C_m, Φ) 가 관측가능하다.

(3) 측정되는 출력의 개수가 제어대상 출력의 개수보다 크거나 같다.

(4) (C_m, Φ, Γ) 의 전이제로(transmission zero)가 지령 입력과 외란의 동적 모드와 일치하지 않는다.

(5) 제어대상의 출력이 물리적으로 측정 가능하다.

전체 페루프계가 점근적으로 안정하고, 원하는 댐핑계수를 갖도록 하기 위해서는, 서보제어기의 이득 벡터 K 를 온라인으로 조정하여, $\Phi(K)$ 의 고유치를 원하는 값으로 지정하여야 한다.

본 연구에서는 전체 페루프계의 극점배치를 위하여 Fahmy와 O'Reilly가 제안한 다단계 고유구조 지정법을 사용하였다[8].

4. 실험 결과

절삭력 적응제어 알고리즘을 실제 절삭 공정에 적용하기 위하여 구성된 실험 장치의 구성도를 Fig.5에 표시하였다. 대상 공작기계는 세일중공업의 수평형 머시닝센터이다. 절삭력 간접 측정을 위한 이송모터의 전류 신호는 500 Hz의 샘플링 주파수로 검출하였으며 절삭력 제어기의 제어샘플링 주파수는 주축의 회전 주파수와 동기시켜 주축의 1회전마다 절삭력 제어를 위한 이송속도 명령을 전달한다.

절삭력 적응제어 알고리즘에서 계산된 이송속도 명령값은 표준화된 접속 방법을 통하여 PC에서 CNC로 직접 전달된다. 이송속도 제어입력은 NC 프로그램상의 기준 이송속도에 대하여 0에서 255%에 해당하는 이송속도 오버라이드값으로 바뀌며, 이 오버라이드값은 8비트의 이진 디지털 데이터의 형태로서 CNC 내의 PMC로 전달된다.

본 논문의 경우 제어되는 절삭력은 x축과 y축 방향 절삭력의 합력으로서 이송방향의 절삭력이며, PMC로 전달되어 지는 이송속도는 x축과 y축 속도의 합속도로서 이송방향의 선속도이다.

본 연구에서 제시한 절삭력 적응제어 시스템의 성능을 확인하기 위하여 실제 절삭공정에 대한 절삭력 제어 실험을 수행하였다. 가공소재는 알루미늄이며, 축 방향 절삭 깊이는 Fig.6.b에서와 같이 연속적으로 변화한다.

공구는 지름 20mm의 2 절삭인선 엔드밀을 사용하였으며, 주축회전수는 600 rpm으로 하였다. 절삭방향은 공구 방향에서 보았을 때, 오른쪽 위에서 왼쪽 아래로 45도 방향으로 대각 절삭을 하였다.

기준 절삭력을 700N으로 하였으며, 이때의 제어된 절삭력과 실제 이송속도를 Fig.7에 표시하였다.

실험 결과로부터 절삭 깊이가 연속적으로 변할

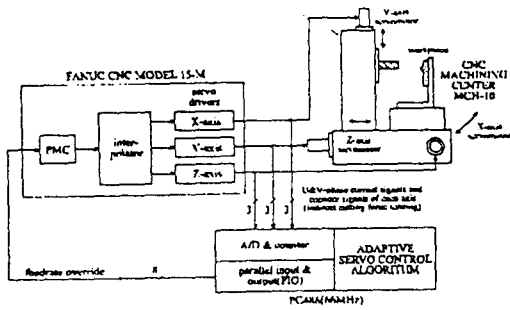


Fig.5 Schematic diagram of the experimental setup

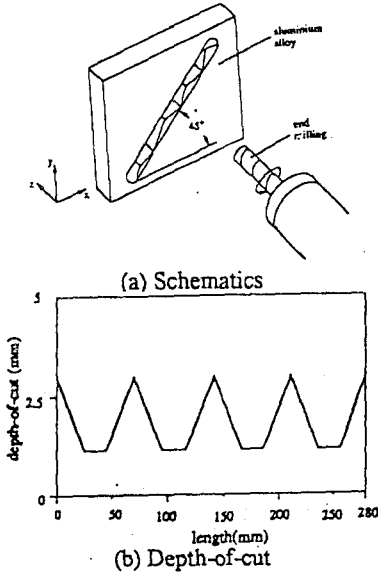


Fig.6 Schematics of the experiment on the diagonal end-milling process

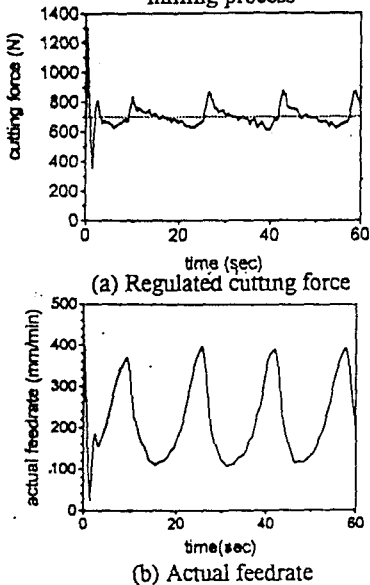


Fig.7 Results of the cutting experiment on the diagonal end-milling process

때, 절삭력이 기준 절삭력에 대하여 추종 제어됨을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 이송 서보모터의 전류를 이용한 절삭력 간접측정 방법과 이를 응용한 견실한 절삭력 적응제어 기법에 대해 연구를 하였다.

이 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 62Hz의 주파수 대역안에서 교류 서보모터의 전류를 이용한 절삭력 간접 측정을 할 수 있었다. 특히, 이송속도와 이송방향이 일정한 대각 절삭의 경우에 적용될 수 있음을 보여 주었다.
- (2) 일반적인 극배치 PID 제어기의 구조를 가진 견실한 적응제어 기법을 제시하였다.
- (3) 앤드밀링 공정의 대각 절삭에 대하여 실시간 제어 실험을 하여 견실한 적응제어 기법의 제어 성능을 보여주었다.

참고 문헌

1. ULSOY, A.G. and KOREN, Y., 1993, Control of Machining Processes, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 115.
2. STEIN, J.L., COLVIN D., CLEVER, G., and WANG C.H., 1986, Evaluation of DC Servo Machine Tool Feed Drives as Force Sensors, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 108.
3. ALTINTAS, Y., 1992, Prediction of Cutting Forces and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurements, ASME Journal of Engineering for Industry, 114.
4. 김태용, 1995, "견실한 적응 제어를 이용한 절삭력 제어에 관한 연구", 서울대학교 공학 박사 학위논문
5. KOGA, T., 1994, About the FANUC Digital Servo, the corresponding letter on the structure of the FANUC servo controller with the authors.
6. GOODWIN, G.C. and SIN, K.S., 1984, Adaptive Filtering, Prediction and Control, (New Jersey: Prentice-Hall).
7. DAVISON, E.J. et. al, 1981, The Design of Controllers for the Multivariable Robust Servomechanism Problem Using Parameter Optimization Methods, IEEE Trans. on Automatic Control, 26.
8. FAHMY, M.M. and O'REILLY, 1988, Multistage Parametric Eigenstructure Assignment by Output-feedback Control, Int. J. of Control, 48.