

칼만필터와 이송모터의 전류 감지를 이용한 밀링 공정시의 절삭력 간접측정

김종원,* 김태용**, 이원희***

Indirect Cutting Force Measurement in Milling Process
using Kalman Filter by Sensing Servo motor Current

Jong-Won Kim*, Tae-Yong Kim**, Won-Hee Lee***

* 서울대학교 기계설계학과

** 서울대학교 제어계측 신기술 연구센터

*** 서울대학교 기계설계학과 대학원

ABSTRACT

This paper presents a practical method of measuring the cutting force in milling process by sensing the feed-drive servo motor current, avoiding the use of a dynamometer. The relation between the cutting force and the servo motor currents is obtained after the feed-drive system of machining center is modelled. In order to measure the cutting force indirectly, the cutting force in the feed-drive system is regarded as a disturbance, and a disturbance estimator is designed using Kalman filter. A horizontal type machining center is used in the experimental study. A comparison is made between the cutting force measured from the dynamometer and the servo motor current

1. 서 론

최근들어 CNC 공작기계의 자동화 및 지능화에 대한 요구가 날로 증가함에 따라, 가공상태에 대한 정보를 얻기 위한 여러 가지 센서 시그널에 대한 중요도 역시 증가하고 있다. 이중에서도 가장 큰 용용 범위에서 활용되고 있는 것은 가공시의 절삭력 신호이다.

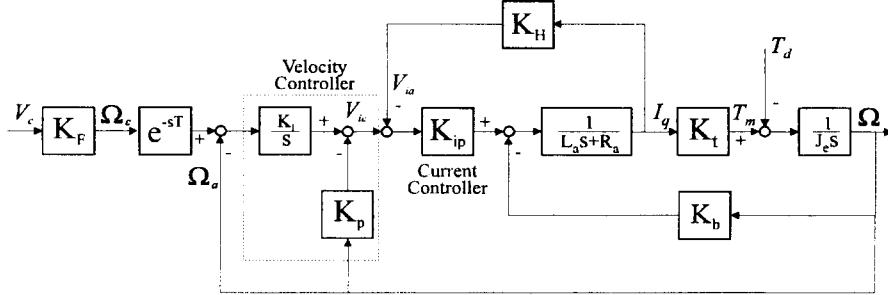
일반적으로 절삭력 측정을 위하여 가장 널리 쓰이는 측정 장비는 공구동력계로서, 이는 가장 간편하게 절삭력을 측정할 수 있으나, 절삭 행정의 제한이나 절삭유 공급과 배선 문제등 그 사용상의 제한으로 인해 실제적인 용용이 어려운 상황이다.

따라서, CNC 공작기계의 자동화 및 지능화를 위해서는 공구동력계를 사용하지 않는 절삭력 측정방법에 대한 연구가 절실히 요구되고 있다. 그 중에서도 실험장치 구성의 편의성 및 경제적인 이유 등으로 인하여 주축모터 및 이송모터의 전류로부터 간접적으로 절삭력을 측정하는 연구가 최근 들어 활발히 진행되고 있다. 이중 주축모터의 전류 감지는 주로 드릴공정에서의 절삭 토오크

감시 분야에서 연구되었으며, 이송모터의 전류감지를 통한 절삭력의 측정은 선삭과 밀링공정을 대상으로 연구된 바 있다. 일반적으로 주축모터의 전류감지를 이용한 절삭력 측정시스템은 주축모터의 큰 관성으로 인하여, 절삭력 측정시스템으로서의 대역폭 및 민감도 면에서, 이송모터 전류감지 시스템에 비하여 불리한 것으로 알려져 있다.

Stein 등은 선삭시 직류 이송모터의 전류와 드릴 공정시의 주축 교류 유도모터의 전류를 감지하여, 절삭력을 간접적으로 측정하였다 [1][2]. Altintas는 밀링공정의 경우에 대하여, 직류이송 서보모터의 전류를 감지하여, 이송서보계의 대역폭 안에서 절삭력을 간접적으로 측정할 수 있음을 보였다.[3] 본논문에서는 수평형머시닝센터를 대상으로 하여, 최근 들어 공작기계의 이송계에 널리 사용되고 있는 교류영구자석 동기형 모터(PMSM, permanent magnet synchronous motor)의 전류감지를 통하여 절삭력 간접측정 시스템을 구성하였다.[4]

공작기계 이송시스템은 위치와 속도 지령에 대한 실제 이송속도와 위치를 출력으로 하는 시스템이며, 이경우



c	feedrate command [mm / min]	-	a	actual feedrate [mm / min]	-
Ω_c	ang. vel. command [rad / min]	-	Ω_a	actual ang. vel. [rad / min]	-
K_i	velocity integral gain [$V / (rad / sec)$]	8.2	K_F	ang. velocity gain [$(rad / sec) / (mm / min)$]	0.0105
K_p	velocity proportional gain [$V / (rad / sec)$]	0.4944	i_a	feedback current [V]	-
i_c	current command [A]	-	K_ip	current proportional gain [-]	7.5429
K_H	current feedback gain [V / A]	0.007	L_a	armature coil inductance [mH]	1.20
R_a	armature coil resistance [ohms]	0.15	I_q	actual current [A]	-
K_t	torque constant [$kgf \cdot m / A$]	0.165	K_b	back EMF constant [V / (rad / sec)]	0.38
T_m	motor drive torque [$kgf \cdot m$]	-	T_d	disturbance torque [$kgf \cdot m$]	-
J_e	equivalent feed-drive inertia [$kgf \cdot m \cdot sec^2$]	0.0146	Ω	angular velocity of motor shaft [rad / sec]	-

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

이송면에서의 마찰력과 절삭력이 이송모터에 외란으로 작용하게 된다. 이와 같이 이송모터에 작용하는 외란은 칼만필터를 이용하여, 최적 상태변수 추정기(optimal state estimator)를 구성함으로써 추정할 수 있다[5]. 따라서, 이송계의 모델을 구성하고 이송모터의 전류를 측정한 후, 칼만필터를 이용한 외란추정기를 구성하여, 이송계에 작용하는 외란 토크를 추정하였다. 이때, 추정된 외란토크는 이송면에서의 마찰력에 의한 성분과 절삭력에 의한 성분으로 나눌 수 있으므로, 실험을 통하여 이송면에서의 마찰력에 의한 외란토크를 구한 후 이로부터 절삭력에 의한 외란토크 성분을 구하였다. 한편, 가공중의 실제 절삭력을 테이블형 공구동력계로 측정하여, 추정된 외란토크로부터 구한 절삭력과 비교하였다.

2. 이송시스템의 모델링

CNC 공작기계의 이송시스템은 서보 모터와 이송 서보 드라이버, 그리고 이송테이블과 리니어 가이드 및 볼스크류 등의 기계적 이송장치를 포함한다. 가공중의 절삭력은 이송서보 시스템의 외란의 형태로 작용하여, 이송서보 드라이버의 전류제어 루프의 피드백을 통하여 이송모터의 전류의 변화로 나타나게된다. 결국, 이송모터의 전류측정을 이용한 절삭력 간접 측정 시스템은 절삭력의 변화량을 입력으로 하고, 이송모터 전류의 변화량을 출력으로 하는 센싱시스템의 형태를 가지게된다. 따라서,

이러한 절삭력 간접 측정 시스템은 기계적 이송부를 포함한 이송서보 시스템의 동적 특성에 따라 센싱 시스템으로서의 성능 및 특성이 결정되게된다. 본 논문에서는 칼만 필터를 구성하기 위하여 우선 이송 시스템을 모델링하고 이를 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증한다.

본 논문에서 사용된 수평형 머시닝센터 MCH-10의 이송서보 드라이버의 속도제어 루프는 제조업체인 FANUC에서 입수한 자료를 바탕으로 Fig.1과 같은 블록 선도로 표시할 수 있다.[6]

속도제어 루프의 경우 FANUC에서 사용하는 IP제어기로 구성되었으며, 전류제어루프는 이상적인 제어기의 형태로 단순화하였다.

이송 각속도 명령값 ω_c 와 실제 이송 각속도 ω_a 의 전달 함수는 다음과 같이 표시된다.[7]

$$\frac{\omega_a(s)}{\omega_c(s)} = \frac{KK_{ip}K_t}{A_1s^3 + A_2s^2 + A_3s + A_4}$$

$$\begin{aligned} A_1 &= J_e L_a \\ A_2 &= J_e (R_a + K_H K_{ip}) \\ A_3 &= K_t (K_b + K_p K_{ip}) \\ A_4 &= K_t K_{ip} K_t \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서 Fig.1의 표에 표시된 값을 대입하면 다음의식을 얻을 수 있다.

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

계단파 입력의 이송속도 명령에 대한 실제 이송속도의 시간 영역에서의 응답을 식(2)에 의한 시뮬레이션과 실험에 의하여 구하였으며, 이를 Fig.2에 나타내었다.

또한 이송 시스템의 속도제어 루프의 주파수 응답을 시뮬레이션과 실험에 의하여 구하고 이를 Fig.3에 나타냈다. 이들로부터 시간영역에서와 주파수 영역의 시뮬레이션 결과가 실험 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

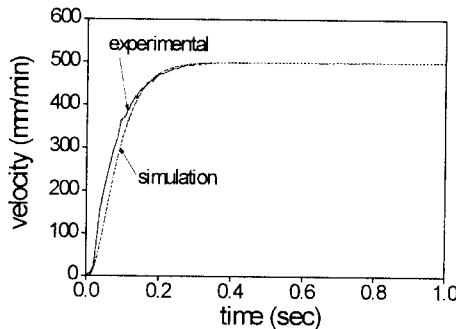


Fig.2 Experimental and simulated step response of the feed-drive system.

Fig.1의 이송시스템은 모터 구동력 T_m 과 이송속도 ω , 그리고 외란 토오크 T_d 등에 대하여 다음과 같이 표시할 수 있다.

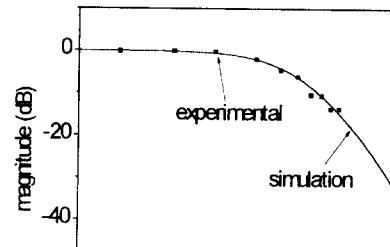
$$K_t I_q = T_m = J_e \frac{d\omega}{dt} + T_d \quad (3)$$

이때 외란으로 작용하는 토오크는 절삭력에 의한 절삭 토오크 성분과 이송면에서의 마찰력에 의한 토오크 성분의 합으로 표시된다. 따라서 식(1)을 다음과 같이 표시할 수 있다.

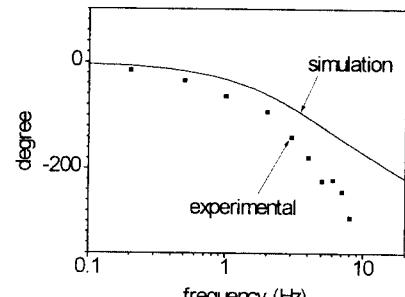
$$K_t I_q = T_m = J_e \frac{d\omega}{dt} + \text{sgn}(\omega) T_f + T_c \quad (4)$$

한편, PMSM의 경우 영구자석으로 이루어진 회전자의 주위에 다음과 같이 위상차 120도를 가지는 상전류가 인가된다.

$$\begin{aligned} I_u &= I \cos(\theta_e) \\ I_v &= I \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \\ I_w &= I \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (5)$$



(a) magnitude



(b)phase

Fig.3 Experimental and simulated frequency response of the feed-drive system

여기서, 3상전류를 홀센서를 통하여 측정하고, 회전자의 위상각 θ_m 을 이송모터의 엔코더로부터 구하면, 다음 식으로 모터의 구동토오크에 비례하는 전류 I_q 를 구할 수 있다.

$$I_q = \sqrt{\frac{2}{3}} \left\{ i_u \cos(n_p \theta) + i_v \cos(n_p \theta + \frac{2}{3} \pi) + i_w \cos(n_p \theta - \frac{2}{3} \pi) \right\} \quad (6)$$

여기서, n_p 는 영구자석의 극수이다.

이송시스템과 절삭공정으로 이루어진 Fig.1의 모델에서 이송모터의 전류 I_q 를 측정한 후, 칼만필터를 이용한 상태변수 추정기를 구성하여, 식(1)에서의 외란 토오크 T_d 를 구할 수 있다. 이때, 추정한 외란 토오크 T_d 는 절삭력과 비례관계에 있으며, 이로부터 가공중의 절삭력을 추정한다.

3. 칼만필터 외란추정기의 구성

Fig 1의 이송시스템을 상태방정식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\frac{dx(t)}{dt} &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t)\end{aligned}\quad (7)$$

여기서,

$$x(t) = [\omega_a \ I_q \ V \ T_d]^T \quad (8)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{K_t}{J_e} & 0 & -\frac{1}{J_e} \\ 0 & -\frac{R_a}{L_a} & \frac{1}{L_a} & 0 \\ -K_{ip}K_1 & C_1 & C_2 & C_3 \\ 100 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ k_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$C_1 = -(K_{ip}K_2 + K_b) \frac{K_t}{J_e} + K_{ip}K_H \frac{R_a}{L_a} \quad (11)$$

$$C_2 = -\frac{K_{ip}K_H}{L_a}, \quad C_3 = \frac{1}{J_e} (K_{ip}K_2 + K_b)$$

시스템의 입력 u 는 이송속도 명령 ω_c 이고, 측정되는 출력 y 는 이송속도 ω , 그리고 이송모터 전류 I_q 이다. 여기에 시스템의 잡음 ζ 와 측정잡음 η 를 고려한 후 이산계에서의 상태방정식을 표시하면 다음과 같다.

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + L_k \zeta_k \quad (12)$$

$$y_k = Cx_k + \eta_k$$

여기서, 제어대상계 잡음 행렬 L 와 시스템 잡음, 그리고 측정잡음은 다음과 같다.

$$L = \left[0 \ \frac{-1}{J_e} \ 0 \ C_3 \ 1 \right]^T \quad (13)$$

$$\zeta = T_{d, noise}, \quad \eta = [\omega_{a, noise} \ I_{q, noise}]^T \quad (14)$$

이때, 다음과 같은 구조를 가지는 칼만필터를 구성한다.

$$\hat{x}_{k+1} = A_k \hat{x}_k + B_k u_k + H_k [y_{k-1} - C \hat{x}_k] \quad (15)$$

여기서, H_k 는 칼만필터의 이득행렬이다.

이때, 다음의 알고리즘에 의하여 시스템의 상태변수를 추정할 수 있다.

$$P_{0,0} = Var(x_0)$$

$$\begin{aligned}P_{k,k-1} &= A_{k-1} P_{k-1,k-1} A_{k-1}^T + L_{k-1} Q_{k-1} L_{k-1} \\ H_k &= P_{k,k-1} C^T (C_k P_{k,k-1} C^T + R_k)^{-1} \\ P_{k,k} &= (I - G_k C_k) P_{k,k-1} \\ \hat{x}_{0,0} &= E(x_0) \\ \hat{x}_{k,k-1} &= A_{k-1} \hat{x}_{k-1,k-1} + B_{k-1} u_{k-1} \\ \hat{x}_{k,k} &= \hat{x}_{k,k-1} + H_{k-1} (y_k - C_k \hat{x}_{k,k-1})\end{aligned}\quad (16)$$

여기서,

H_k : 칼만필터의 이득행렬

Q_k : 불규칙벡터 ζ_k 의 분산행렬

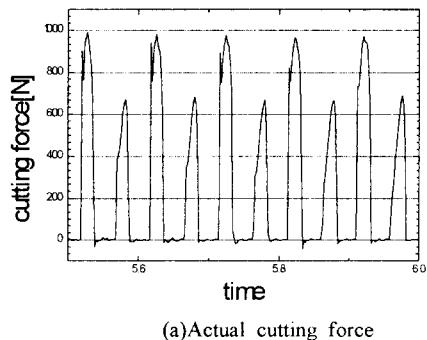
R_k : 불규칙벡터 η_k 의 분산행렬

$$Q = q_{00}, \quad R = \begin{bmatrix} r_{00} & 0 \\ 0 & r_{11} \end{bmatrix}$$

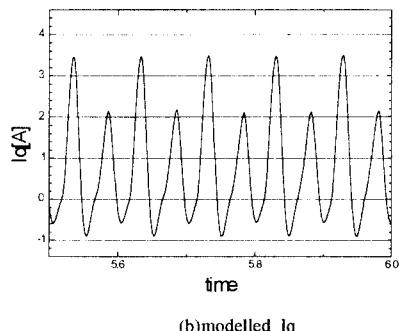
4. 시뮬레이션 결과

이상에서 칼만 필터를 이용한 절삭력 간접측정 장치에 대하여 시뮬레이션을 수행한다. 시뮬레이션은 우선 실제 절삭시 공구 동력계를 이용하여 측정한 절삭력을 Fig.1의 서보 모델에 인가하여 모터의 입력 전류 I_q 와 각속도를 구한 후 이를 칼만 필터의 입력으로 하여 절삭력을 추정한다. 이와 같이 추정한 절삭력과 실제로 측정한 절삭력의 패턴과 정량적인 값을 비교하여 절삭력 간접측정 시스템의 타당성을 확인하였으며, 시뮬레이션 결과를 Fig.4에 나타냈다. 절삭 조건은 2날 엔드밀로 반경 방향 절삭 깊이가 공구 직경의 반이 되게하여 절입비를 0.5로 하였기 때문에 그림에서 보는 바와 같이 절삭력 성분은 양의 반정현파의 형상을 띠게된다. 그림에서 공구의 런-아웃으로 인하여 서로 다른 절삭력의 피크값을 보이며, 절입비가 0.5이므로, 한개의 공구날과 다른공구날에 의한 절삭

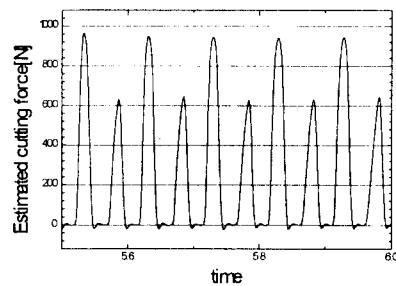
력 신호사이에 절삭이 이루어지지 않는 부분을 포함한다. 한편 모델로부터 구한 전류 성분은 이러한 절삭력의 패턴과는 달리 완전한 정현파의 형태를 지니고 있으며, 이는 이송서보계의 동특성으로 인한 현상이다. 만약, x축의 일축 이송시 절입비를 1로 하여 슬롯커팅을 하게되면, 절삭력의 신호는 이송모터의 전류 신호의 패턴과 같이 완전한 정현파의 형태를 띠게된다. Altintas는 이와 같은 실험조건 하에서, 이송서보계의 동특성을 포함하지 않는 모델을 이용하여, 절삭력과 전류신호의 관계를 단순한 선형비례 관계로 모델링 하였다.[3] 그러나, 시뮬레이션 결과로부터 알 수 있듯이, 이와 같은 모델을 사용할 경우 이송서보계의 동특성으로 인한 절삭력과 전류 신호의 패턴의 불일치 문제를 해결할 수 없게된다. 그러나 본논문에서 제시한 칼만 필터를 이용한 절삭력의 간접측정 방법을 통하여 전류신호에 나타나는 이송서보계의 동특성으로 인한 영향을 배제시키고, 음의 성분을 갖지 않는 반정현파 형태의 절삭력을 간접적으로 추정해 낼 수 있다. 시뮬레이션결과로부터 실제의 절삭력과 칼만필터를 이용하여, 이송모터 전류로부터추정한 절삭력 신호의 패턴이 서로 일치하는 것을 확인할 수 있다.



(a)Actual cutting force



(b)modelled I_q



(c)Estimated cutting force

Fig.4 Actual cutting force and simulated I_q , and estimaed cutting force

5. 실험장치의 구성 및 실험결과

이송모터의 전류감지를 이용한 절삭력 간접측정 실험장치 FANUC CNC Model 15M을 장착한 수평형 머시닝센터

를 대상으로 구성하였다. 이송모터의 3상전류 중 2개의 상전류를 휠센서를 이용하여 감지하였고, KISTLER 테이블형 공구동력계를 설치하여 가공중의 실제 절삭력을 측정하였다. 이송모터 회전자의 각위치 측정과 이송속도의 측정을 위하여 모터내에 내장된 엔코더 신호를 이용하였다.

공구동력계를 이용하여 측정한 이송 방향의 절삭력 신호와 측정한 이송모터의 I_q 전류, 그리고 칼만필터를 이용하여 추정한 외란을 Fig.5에 나타내었다.

밀링공정은 반경방향 절삭깊이가 공구반경과 같은 슬롯컷팅으로 하고 공구를 X,Y의 대각 방향으로 이송하였다. 그림에서 보는바와 같이 공구동력계로 측정한 실제 절삭력 신호와 이송 모터전류의 패턴이 서로 다른 형태를 띠고 있다. 절삭력의 경우 음의 값을 갖지 않는데 비하여 측정된 X축 이송모터의 전류 I_q 는 비가공시의 전류 2.6A를 빼면 음의 전류 성분을 갖게되고 그 크기가 양의 전류 성분 크기의 약 49%에 해당한다. 그러나 칼만필터를 통하여 추정한 외란은 비절삭 이송시의 마찰력에 의한 외란하는 700N을 빼면 음의 값을 갖지 않고 절삭력의 패턴과 유사한 경향을 보인다. 즉, 칼만 필터를 이용한 상태변수 추정기를 통하여 구한 외란 신호가 이송 모터의 전류에 비하여 절삭력 신호의 패턴에 근사함을 확인할 수 있다. 칼만 필터를 이용하여 구한 외란에서 이송면에서의 마찰력 성분을 보정해주면 최종적으로 실제 절삭력에 정량적으로 근사하는 절삭력 간접측정장

치를 구현할 수 있다.

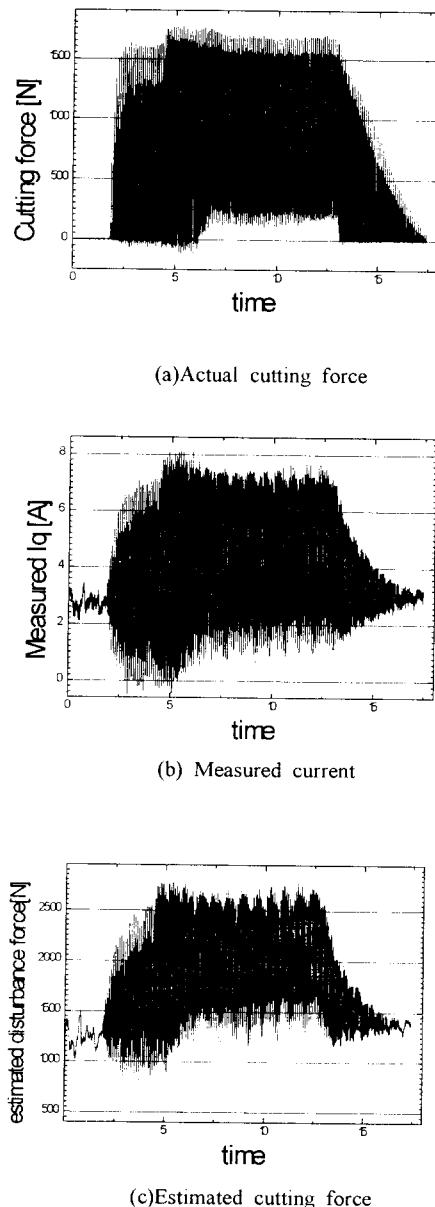


Fig.4 Actual cutting force and measured feed drive current I_q , and estimated cutting force.(feedrate:300mm/min, workpiece : SM45C steel, spindle speed:600 rpm, 2flute-end mill with dia. 20 mm, axial depth of cut : 2.5 mm)

6. 결 론

본논문에서는 이송 서보계를 모델링하고 이송모터의 전류를 측정한 후, 칼만필터를 이용한 상태변수 추정기를 구성하여, 이로부터 가공시의 이송계에 외란으로 작용하는 토오크 성분을 추정하였다. 외란 토오크는 절삭토오크와 이송면에서의 마찰 토오크의 합력으로 나타나게 되므로, 이송 테이블면에서의 마찰력을 실험을 통하여 측정한 후, 추정된 외란토오크 성분 중의 절삭력 성분을 간접적으로 측정할 수 있다.

참고문헌

- [1] 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, pp.279-288
- [2] J.L. Stein, 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
- [3] Y.Altintas, 1992, "Prediction of Cutting Force and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurements", ASME Journal of Engineering for Industry, vol.114, pp.386-392
- [4] 김종원, 김태용, 1995, "견실한 적응 제어기를 이용한 절삭력 채어", 한국정밀공학회지, 제12권, 제4호, pp.55-56
- [5] H.W. Kim and S.K. Sul, 1994, "A New Motor Speed Estimator using Kalman Filter in Low Speed Range", IEEE
- [6] Koga, T., 1994, "About the FANUC Digital Servo," the corresponding letter on the structure of the FANUC servo controller with the authors.
- [7] 김태용, 1995, "견실한 적응제어기를 이용한 절삭력 제어에 관한 연구", 서울대학교 공학 박사 학위논문