

주축 모터 동력을 이용한 절삭력 예측

Cutting Force Estimation Using Spindle Motor Power

최영준* (서울대 대학원), 김기대(서울대 대학원), 이성일 (서울대 대학원), 주종남 (서울대 기계설계학과)
 Y. J. Choi* (Graduate School, Seoul Nat'l Univ.), G. D. Kim (Graduate School, Seoul Nat'l Univ.),
 S. I. Lee (Graduate School, Seoul Nat'l Univ.), C. N. Chu (Seoul Nat'l Univ.)

ABSTRACT

An indirect cutting torque and cutting force estimation method is presented. This method uses a time-domain model between the cutting torque and the spindle motor power, which calculated from measured spindle motor current and voltage. Spindle motor power is linear with cutting torque in this model. The cutting force is proportional to the cutting torque. Using trial cut, parameters are determined. Static sensitivity is suitable for various cutting conditions. The presented method is verified under several cutting tests on the CNC horizontal machining center.

Key Words : Spindle Motor Power(주축 모터 동력), Cutting Torque(절삭 토크), Cutting Force(절삭력), Static Sensitivity(정적 민감도)

기호 설명

I_m, I_{sp} : 모터와 주축의 관성모멘트 [$kg \cdot m^2$]
 B_m, B_{sp} : 모터와 주축의 점성마찰계수 [Nm/sec]
 T_f : 마찰 토크 [Nm], T_d : 외란 토크 [Nm]
 T_e : 모터 토크 [Nm], T_c : 절삭 토크 [Nm]
 R_s, R_r : 고정자와 회전자의 상저항 [Ω]
 I_s, I_r : 고정자와 회전자의 상전류 [A]
 X_s, X_r : 고정자와 회전자의 리액턴스 [Ω],
 I_{uw}, I_{vw}, I_{wu} : 고정자의 상전류(선간전류) [A]
 V_{uw}, V_{vw}, V_{wu} : 고정자의 상전압(선간전압) [V]
 V_s : 고정자의 3상전압행렬 [$V_{uw} \ V_{vw} \ V_{wu}$]^T
 I_s : 고정자의 3상 전류행렬 [$I_{uw} \ I_{vw} \ I_{wu}$]^T
 R_s : 고정자의 저항 행렬 $\begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$
 X_m, R_m : 자화 리액턴스, 저항

m : 모터의 상수(number of phase)
 p : 극수 (number of pole)
 K_s : 비절삭저항 [N/m^2]
 a : 축방향 인입량 [mm]
 S_i : 날당 이송량 [mm/tooth]
 ϕ : 절삭각
 $h(\phi)$: 임의의 위치에서의 칩두께 [mm]
 R : 공구의 반경 [m]

1. 서론

제조 공정의 자동화, 무인화 추세로 생산라인의 범용공작기계를 NC, CNC 공작기계로 대체하고 있다. 그러나, NC코드를 잘못 생성하거나 공작물을 잘못된 위치로 초기 세팅(setting)하여 공구에 과다한 부하를 주어 공작물 및 공구의 파손, 채터등을 야기시키는 등 돌발적인 상황에 대처하지 못하는 경우가 많아서, 안전한 자동화, 무인화의 생산공정 확립이 시급한 실정이다. 따라서, 실시간으로 절삭상

태를 감시하는 시스템이 필요하게 되었다. 절삭상태를 가장 정확하게 나타내어주는 것이 절삭력임은 그동안의 연구 결과에서 잘 알려져있다. 하지만, 절삭력의 측정에 사용되는 공구동력계는 절삭력을 효율적으로 정확하게 측정할수 있는 반면, 비용과 설치상의 문제뿐 아니라 가공물의 크기와 형상의 제약, 절삭유의 급유, 배선 문제등으로 생산현장에서 사용하기에 부적합하다. 따라서, 간접적으로 절삭력을 측정할수 있는 시스템이 필요하게 되었다.

Mohri, Takata 등은 DC 주축모터 전류신호를 이용하여 공구파손을 검출하였고, (1),(2) Stein, Altintas 등은 이송모터 전류를 이용하여 절삭력을 예측하였으며, (3),(4) 안중환등은 주축모터 전류신호를 이용하여 드릴공정 중 공구마모와 파괴를 연구하였다. (5),(6) 그리고, Chai 는 전동밸브의 모터 단자에서 전류와 전압을 측정하여 전동밸브의 이상작동을 감시하였으며 (7), Park, Stein등은 주축 모터의 동력을 측정하여 절삭 상태를 감시하였다. (8),(9)

본 연구에서는 수평형 머시닝센터의 주축 모터의 터미널 단자에서 전류와 전압을 측정하여 입력 동력을 계산하고, 이것과 절삭토크 사이의 관계를 규명하였다. 그리고, 절삭토크에서 주축 1회전의 평균절삭력을 예측 하였다.

2. 이론

2. 1. AC 유도 모터 주축계

2단의 변속비를 갖고 있고, AC 3상 유도모터를 갖춘 수평형 머시닝센터의 주축계를 모델링한다. 변속은 900 rpm 을 경계로 하여 감속비가 각각 1.157, 4.81이다.

기계부분 모델링. 기계부분을 모델링하기 전에 다음과 같은 가정을 한다. 주축계의 점성마찰은 주축과 모터의 회전속도에 비례하고, 쿨롱마찰은 주축과 모터의 회전속도에 관계없이 일정하며 두 값은 절삭토크에는 무관한 것으로 간주한다. 먼저 주축계의 등가 관성모멘트는 다음과 같이 표현할수 있다

$$I = I_m + I_{sp} \left(\frac{\omega_{sp}}{\omega_m} \right)^2 \quad (1)$$

또한, 주축계의 기계부분 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$I \frac{d\omega_m}{dt} + B_m \omega_m + (B_{sp} \omega_{sp}) \frac{\omega_{sp}}{\omega_m} = T_e - T_f - T_d \quad (2)$$

여기서 외란토크 (T_d)는 절삭공정의 절삭토크나, 기계부의 오작동(malfunctions)을 포함하고 있다. 일반적으로 유도모터는 극한 하중이 걸리지 않고 절삭공정이 정상상태라면 절삭공정 중 회전속도는 거의 변화가 없으며, (10) 외란토크에 절삭토크를 제외한 다른 영향이 없다고 가정하면 식(2)와 식(3)에서 절삭토크 (T_c)와 모터토크 (T_e)는 다음의 관계가 있음을 알수 있다

$$T_c \omega_{sp} = T_d \omega_m \quad (3)$$

$$T_c = (T_e - T_f - B_m \omega_m) \frac{\omega_m}{\omega_{sp}} - B_{sp} \omega_{sp} \quad (4)$$

모터부분 모델링. 유도모터는 회전자 부분이 델타 권선으로 연결되어 있다. (11) 고정자에 3상 전압이 인가되고 회전자에 유도전압이 발생하여 전류가 흐르고 토크가 발생하여 모터가 회전하게 된다. 유도모터는 자계가 회전하기 때문에 3상을 고정 좌표계에서 해석하기가 어렵다. 따라서, 3상 중 1상만을 고려하여 식을 유도한다. Fig. 1에 유도모터의 1상 회로가 있다. 유도모터의 회로는 변압기와 유사하다.

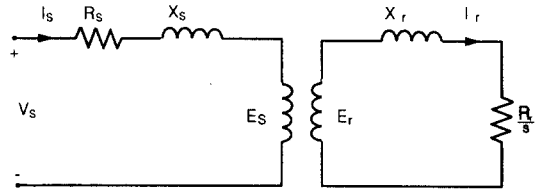


Fig. 1 Stator and rotor as coupled circuits

변압기의 1차측은 모터의 고정자, 2차측은 모터의 회전자로 등가시킬수 있다. 유도모터와 변압기의 차이점은 1차측의 전류 주파수와 2차측의 전류 주파수가 다르다는 점과 1차측과 2차측의 사이가 철심으로 되어있는 것이 아니라, 공극 상태로 되어 있다는 점이다. Fig. 1에서 s는 슬립(slip)을 나타내며 식(5)로 정의되어 있다.

$$s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s}, \quad \omega_s = \frac{120f}{p} \quad (5)$$

따라서, 모터의 실제 회전속도는 다음과 같다.

$$\omega_m = (1-s)\omega_s \quad (6)$$

식(6)에서 모터의 회전 속도가 슬립에 의하여 변화됨을 알 수 있다. 유도 모터에서 회전자의 전류와 전압을 측정할 수 없으므로 회전자의 값을 고정자에서 등가시킨 등가회로로 수정한다. Fig. 2는 그 등가회로를 나타낸다. Fig. 2에서 주의하여 볼 것은 등가회로 상의 회전자의 가변저항인 $\frac{R_r'}{s}$ 이다.

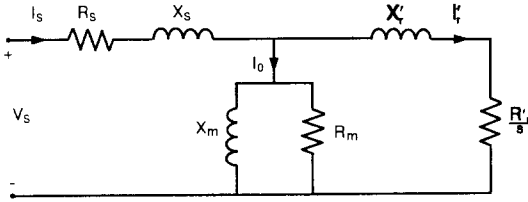


Fig. 2 Equivalent circuit of an induction motor

회전자의 저항은 슬립에 의하여 변한다. 따라서, 부하가 바뀌게 되면 슬립이 변화되고 전체회로에 흐르는 전류의 양이 변화하게 되어 모터의 입력 동력이 변하게 된다. 회전자의 가변저항은 식(7)처럼 나눌 수 있다.

$$\frac{R_r'}{s} = R_r' + \frac{R_r'}{s}(1-s) \quad (7)$$

식(7)에서 우변의 첫째항은 회전자에서 전기적으로 손실되는 항으로, 둘째항은 모터의 부하에 따라서 변화하는 동적 저항으로 생각할 수 있다. 그러므로, 모터의 토크는 동적저항에서 손실되는 동력으로 볼 수 있다. 따라서, 모터토크는 다음과 같다.

$$T_e = [m I_r'^2 R_r' \frac{(1-s)}{s}] \frac{1}{\omega_m} \quad (8)$$

그런데, 회전자에 공급되는 입력 동력은 고정자의 입력 동력에서 전기적인 손실을 제외한 부분이 되며, 회전자의 저항에서 손실되므로 식(9)처럼 쓸 수 있다.

$$P_g = m I_r'^2 \frac{R_r'}{s} \quad (9)$$

식(6), 식(7), 식(8)에서 ω_m 를 소거하면 모터 토크는 다음과 같이 간단한 형태로 나타낸다.

$$T_e = \frac{P_g}{\omega_s} \quad (10)$$

여기서, 회전자 입력동력은 다음식으로 결정된다.

$$P_g = V_s^T I_s - I_s^T R_s I_s \quad (11)$$

식(11)에서 V_s , I_s , R_s 은 고정자의 상전압, 상전류, 저항을 나타내는 행렬이다. 그런데, 모터가 정상상태로 회전할 때 슬립은 대략 0.05 이하의 값을 갖는 것으로 알려져 있다.^{(10),(12)} 따라서, 식(6)에 의해서 ω_s 는 ω_m 으로 근사화할 수 있고, 모터 토크는 회전자 입력동력과 모터 속도로만 나타낼 수 있다.

$$T_e = \frac{P_g}{\omega_m} \quad (12)$$

절삭토크와 모터 입력 동력의 관계. 절삭토크와 모터의 입력 전압은 식(4)와 식(12)에서 모터토크(T_e)를 소거하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$T_c = \frac{P_g}{\omega_{sp}} - T_f \left(\frac{\omega_m}{\omega_{sp}} \right) - (B_m \left(\frac{\omega_m}{\omega_{sp}} \right)^2 + B_{sp}) \omega_{sp} \quad (13)$$

위의 식에서 우변의 세항중 첫째항 P_g 는 3상 전류와 전압을 측정하여 얻을 수 있으며 둘째항과 세번째항은 간단한 절삭실험과 최소오차자승법으로 구해낸다.

2. 2 절삭토크와 절삭력의 관계

절삭력 모델링. 상향 밀링에서의 절삭 기구를 Fig. 3에서 나타내고 있다. 절삭력은 X방향 절삭력과 Y방향 절삭력을 반경방향 절삭력과 접선방향 절삭력으로 나눌 수 있고, 일반적으로 접선방향 절삭력은 순간 칩 면적에 비절삭저항(specific cutting pressure)을 곱하여 얻을 수 있으며, 반경방향의 절삭력은 접선방향 절삭력에 상수를 곱하여 얻을 수 있다.^{(13),(14)}

절삭날의 노우즈(nose)에 의한 치수효과(size effect)를 무시하기로 하면 접선방향 절삭력과 반경방향 절삭력은 다음 식처럼 표현된다.

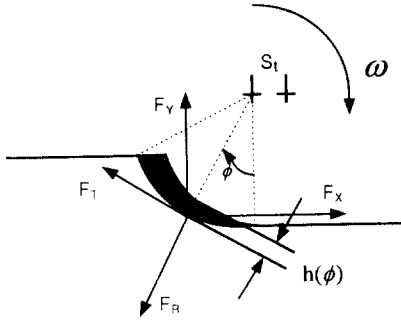


Fig. 3 Cutting mechanism in up milling

$$\begin{aligned} F_T &= K_s a h(\phi) = K_s a S_t \sin \phi \\ F_R &= r_1 K_s a h(\phi) = r_1 F_T \end{aligned} \quad (14)$$

접선방향 절삭력과 반경방향 절삭력을 X방향 절삭력과 Y방향 절삭력으로 좌표변환을 하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_X &= F_T \cos \phi + F_R \sin \phi \\ F_Y &= F_R \cos \phi - F_T \sin \phi \end{aligned} \quad (15)$$

접삭토크와 절삭력의 관계. 절삭토크는 접선방향의 절삭력에 공구 반경을 곱하여 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} T_c &= R F_T \\ &= R [F_X \cos \phi - F_Y \sin \phi] \end{aligned} \quad (16)$$

그리고, X방향 절삭력과 Y방향 절삭력의 합력(resultant force)은 식(14), (15)에 의해 다음과 같이 접선방향의 절삭력으로 표현된다.

$$F_{res} = \sqrt{F_X^2 + F_Y^2} = \sqrt{1 + r_1^2} F_T \quad (17)$$

그런데, 기존의 연구에서 정상절삭 과정인 경우 r_1 이 0.1 ~ 0.5의 값을 밝혀 놓았다.^{(13),(14)} 따라서, 접선방향에 대한 절삭력의 합력의 비는 대략 1.0 ~ 1.1의 값을 갖게 된다. 그러므로, 절삭토크를 알수 있다면 식(16)에 의해서 접선방향의 절삭력을 계산할수 있고 이것에 일정한 상수를 곱함으로써 절삭력의 합력을 계산할수 있다.

$$F_{res} = \frac{T_c}{R} C_f \quad (18)$$

비례상수 C_f 는 절삭실험을 통해서 얻을 수 있다.

3. 실험장치 및 구성

3.1 머시닝센터 및 데이터 습득장치

실험에 사용된 머시닝센터는 통일중공업(주)의 수평형 머시닝센터(모델:MCH-10)이며, 주축 모터는 FANUC 15S의 AC 유도 모터를 사용하고 있다. AD2210보드를 사용하여 1kHz로 주축 모터 전류, 전압과 머시닝센터의 주축제어유닛(spindle control unit)에서 나오는 모터의 속도를 측정하였고, 공구동력계로 X, Y 방향 절삭력을 측정하였다.

3.2 홀센서, 전압분할기 및 아날로그 필터

주축모터의 선전류를 측정하기 위하여 홀센서(hall sensor)를 사용하였다. 이러한 홀센서는 기계자체의 회로 및 절삭계에는 영향을 미치지 않고 전류를 측정하여 기계의 상태를 간접적으로 감시할수 있으며 비용이 저렴하다는 장점을 가지는 반면에, 전자기유도현상을 이용한 것이므로 주파수 대역에 제한을 받을 수 있다는 단점을 가지고 있다. 이에 센서 보정기(FLUKE 5100B)를 사용하여 센서의 주파수 대역을 구하였다. 실험결과는 1kHz까지 주파수 대역에 아무런 문제가 없었다. 모터에서 나오는 전압은 약 200V의 고압이기 때문에 A/D보드로 직접 측정할수 없다. 그래서, 선전압을 측정하기 위하여 전압분할기(voltage divider)를 사용하여 200V의 전압을 5V이하로 낮추었다. 그리고, 상전압(phase voltage)을 측정하기 위하여 차동 증폭기(differential amp)를 사용하였다. 실제 실험에서는 전류, 전압신호가 강전반을 지나서 나오기 때문에 잡음(noise)이 심하여 차단주파수(cutoff frequency)가 200Hz인 아날로그 필터를 사용하여 고주파수의 잡음을 제거하였다.

4. 실험 결과

4.1 전류, 전압신호

실험에서 측정한 전류는 선전류이므로 상전류로 바꾸어야 한다. 델타권선의 선전류는 상전류의 $\sqrt{3}$ 배이고, 위상은 $\pi/6$ 뒤떨어진다. 측정된 상전류와 상전압을 보면, 각 신호의 주파수는 같으나, 약 30°의

위상차가 나타남을 알수 있었다.

4.2 계수 결정

식(13)의 저항 값은 모터의 터미널 단자들을 단락 시켜 놓은 후 직류 전원을 가지고 각 단자사이의 저항을 측정하고, 절연특성을 고려하여 보정하였다.⁽¹¹⁾ 그리고, 실험에 사용된 머시닝센터가 2단의 기어비를 가지고 있으므로 각각의 기어비마다 계수를 결정했다. 예비절삭 실험의 조건은 Table 1에 있고, 각각의 실험조건을 조합하여 슬롯 절삭을 수행하였다. 그런데, 밀링공정은 단속절삭이므로 절삭력이 주기적으로 나타난다. 그러나, 주축계는 낮은 대역폭을 가지고 있으므로 높은 주파수를 갖는 절삭력은 주축계에 잘 반영되지 않는다. 따라서, 순간적인 절삭토크를 사용하지 않고 주축 1회전 당 평균 절삭토크를 사용하였다. 예비절삭을 통해서 구해진 계수는 Table 2와 같다. 그리고 식(18)에서 C_f 는 절삭조건에 따라서 약간의 차이는 있었으나, 1.03에서 1.11사이의 값을 가지고 있음이 밝혀졌다. 따라서, C_f 는 기어비에 상관없이 항상 평균 값 1.075를 사용하기로 한다.

Table 1. Condition of Cutting Test

Cutting Tool : $\phi 20$ flat end mill, 2 teeth		
Workpiece : SM45C		
In High Gear Ratio		
spindle rpm	d.o.c.(mm)	feed rate(mm/min)
300,500, 700,900	1, 2	50, 100, 200
In Low Gear Ratio		
spindle rpm	d.o.c.(mm)	feed rate(mm/min)
1000,1500, 2000,2500	2, 3	100,200,300

Table 2. Parameter List

In High Gear Ratio		
$R (\Omega)$	$T_f (\frac{\omega_m}{\omega_{sp}})(Nm)$	$(B_m (\frac{\omega_m}{\omega_{sp}})^2 + B_{sp})(Nm/s)$
0.349	2.6629	0.0400
In Low Gear Ratio		
$R (\Omega)$	$T_f (\frac{\omega_m}{\omega_{sp}})(Nm)$	$(B_m (\frac{\omega_m}{\omega_{sp}})^2 + B_{sp})(Nm/s)$
0.349	1.6160	0.0022

4.3 정적민감도(static sensitivity)

계수를 결정할때 평균토크를 사용했으므로 밀링공정을 정적공정으로 생각할수 있다. 따라서, 식(12)에서 다음을 유도해낼수 있다.

$$\frac{P_{g,net}}{T_{c,net}} = \omega_{sp} \quad (20)$$

위의 식에서 절삭토크에 대한 고정자의 동력은 회전속도의 함수임을 볼 수 있다. Fig. 4에서 그 사실을 쉽게 알수 있다.

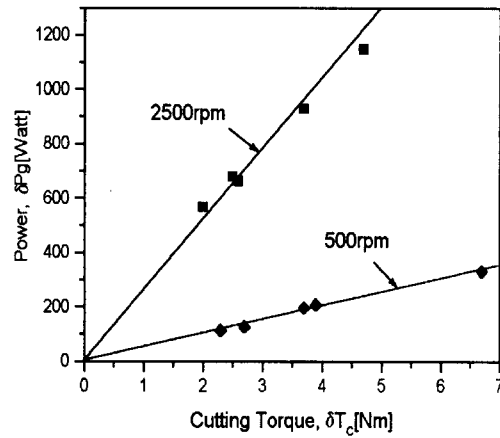


Fig. 4 Static sensitivity of spindle system

4.4 예측값과 실제값의 비교

앞에서 구한 계수를 가지고 두 기어비에 대하여 각각 스텝과 테이퍼 모양의 공작물을 슬롯 절삭하여 실제 절삭력과 예측된 절삭력을 비교해 보았으며, 대각 절삭 실험을 통하여 절삭 방향에 상관없이 절삭력을 예측할 수 있음을 확인하였다.

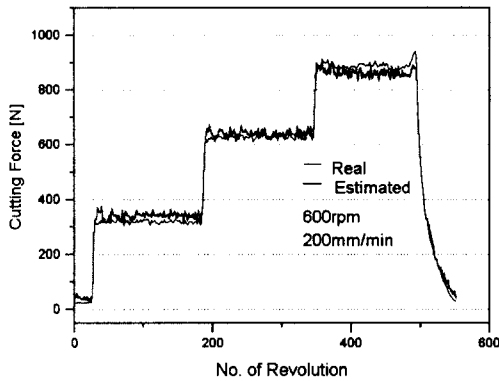
전체적인 결과를 보면 축방향 인입량이 작은 곳은 예측값이 약간 크고, 인입량이 큰 곳은 예측값이 약간 작게 나오는 것을 볼수 있는데, 이것은 C_f 를 결정할때 평균값을 썼기 때문이라고 생각된다. 스텝의 경우 절삭력은 계단입력으로 생각할수 있는데 각 경우 예측값이 실제값에 근사하게 따라가는 것을 볼수 있다. 이것은 절삭력의 순간적인 변화를 잘 예측하는 것으로 해석할수 있다. 그리고, 테이퍼의 경우는 램프(ramp)입력으로 생각할 수 있는데 이것 역

Table 3. Cutting Condition

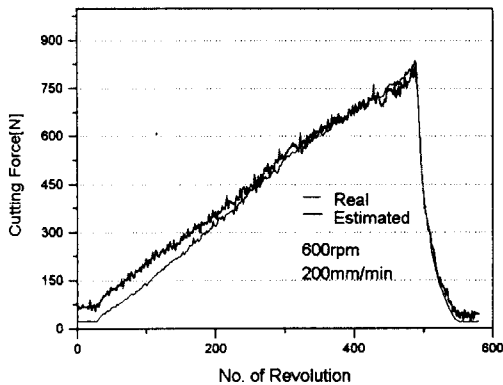
	Work-piece	spindle (rpm)	d.o.c.(mm)	feed (mm/min)
In High Gear Ratio	SM45C	600	step(1~3)	200
In Low Gear Ratio		600	taper(0~3)	200
In High Gear Ratio	SS41	1200	step(1~3)	300
In Low Gear Ratio		1800	taper(0~3)	300
Diagonal Cutting	SS41	600	step(1~3)	250
		600	taper(0~3)	250

시 각 경우 모두 예측값이 실제값을 잘 반영하고 있다. 이것으로 절삭력의 변화 속도를 예측값이 잘 추종하고 있다는 사실을 알 수 있다.

대각 절삭의 경우에서도 스텝모양과 테이퍼모양의 공작물에서 절삭력을 잘 추종하는 것을 볼 수 있었으며, 특히 스텝모양의 공작물 절삭시 공구의 파손으로 인한 절삭력의 변화 또한 그대로 나타남을 볼 수 있었다.

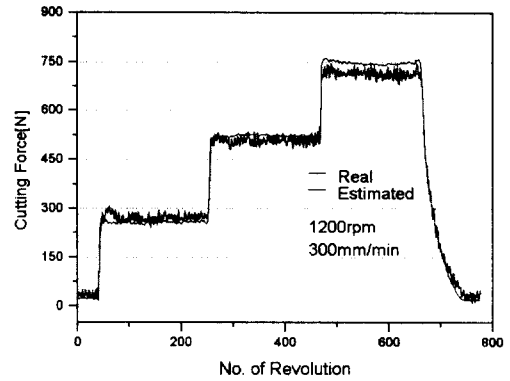


(a) In high gear Ratio, step cutting

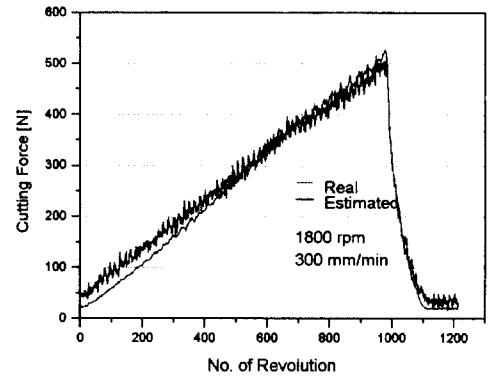


(b) In high gear ratio, taper cutting

Fig. 5 Comparison of real cutting force with estimated cutting force in high gear ratio

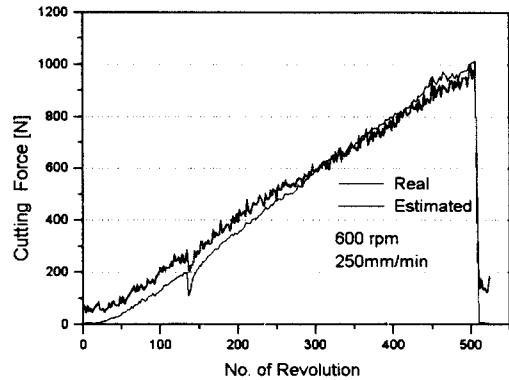


(a) In low gear ratio, step cutting

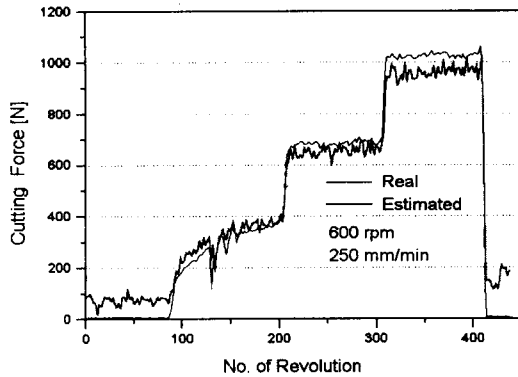


(b) In low gear ratio, taper cutting

Fig. 5 Comparison of real cutting force with estimated cutting force in low gear ratio



(a) Diagonal taper cutting.



(b) Diagonal step cutting

Fig. 5 Comparison of real cutting force with estimated cutting force in diagonal cutting

5. 결론

절삭 상태를 가장 잘 반영하는 절삭력을 예측하기 위하여 공작기계의 주축 모터 동력을 이용하는 방법을 제시하였다. 이를 위하여 주축 모터 동력과 절삭토크 사이의 관계를 규명 하였으며, 절삭토크와 절삭력의 관계를 유도하였다. 그리고, 간단한 절삭 실험과 최소오차 자승법으로 계수들을 얻었다. 최소 오차 자승법에 사용된 토크는 주축계의 낮은 대역 폭으로 인해 주기적으로 변하는 순간토크를 사용하지 않고, 주축 1회전의 평균 토크를 사용하였다. 그리고, 실험을 통하여 예측값이 실제값을 잘 반영하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 여기에 제시된 방법은 절삭력 제어나, 과부하 검출 등 다양하게 응용될 수 있을 것이다.

참고 문헌

(1) Morhi, N., Bertok, P., and Sata, T., "In Process Monitoring of Tool Breakage Based on Auto-Regressive Model", *Information Control Problems in Manufacturing Technology*, Maryland, U.S.A., 1982
 (2) Takata, S., Ogawa, M., et al., "Real-Time Monitoring System of Tool Breakage using Kalman Filtering", *Robotics and computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 2, No. 1, pp. 33-40, 1985
 (3) Altintas, Y., "Prediction of Cutting Forces and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurement", *ASME*

Journal of Engineering for Industry, Vol. 114, pp. 386-391, 1992

(4) Stein, J. L., Colvin, D., Clever, G., Wang, C. H., "Evaluation of DC Servo Machine Tool Feed Drives as Force Sensors", *ASME Journal of Dynamics Systems Measurement and Control*, Vol. 108, pp. 279-288, 1986

(5) 안중환, 김화영, "모터전류를 기초로 한 드릴 마멸 모델링과 실시간 마멸 추정", *한국정밀공학 학회지* 제 12권, 제5호, pp. 77-87, 1995

(6) 안중환, 김화영, "모터전류를 이용한 드릴가공에서의 절삭이상상태 감시 시스템", *한국정밀공학 학회지* 제 12권, 제5호, pp. 98-107, 1995

(7) Chai, J. B., "Non-Invasive Diagnostics of Motor-Operated Valves", *Ph. D. Thesis*, Dept's of Mechanical Engineering, M.I.T., 1993

(8) Park, J. J., Luca, S., "Cutting Torque Estimation Using Spindle Power Measurements", *Transactions of NAMRI/SME*, Vol. 24, pp. 85-90, 1994

(9) Stein, J. L., Wang, C. H., "Analysis of Power Monitoring on AC Induction Drive Systems", *ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, Vol. 112, pp. 239-248, 1990

(10) 박민호, "전기기기공학", 동명사, 중판, 1995

(11) FANUC LTD, "FANUC AC Spindle Motor Series 仕様説明書", Japan, 1987

(12) Paul, C. R., Nasar, S. A., Unnewehr, L. E., "Introduction to Electrical Engineering", Mc Graw-Hill, 2nd Edition, 1992

(13) Altintas, Y., Yellowley, I., "In-Process Detection of Tool Failure in Milling Using Cutting Force Models", *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 111, pp. 149-157, 1989

(14) Yellowley, I., "Observations on the Mean Values of Forces, Torque and Specific Power in the Peripheral Milling Process", *Int. J. Mach. Tool. Des.*, Vol. 25, No. 4, pp. 337-346, 1984