

## 절삭공정 모니터링을 위한 이송모터와 주축모터 전류

오영탁\* (서울대 정밀기계설계공동연구소), 김기대 (대구가톨릭대 기계자동차공학부),  
주종남 (서울대 기계항공공학부)

Feed and spindle motor currents as monitoring parameters in cutting process

Y. T. Oh(Inst. of Advan. Mach. & Design, SNU), G. D. Kim(School of Mechanical & Automotive Eng., CUD), C. N. Chu(School of Mechanical & Aerospace Eng., SNU)

### ABSTRACT

Feed and spindle motor currents are used to monitor the cutting process practically. The sensitivity of spindle drive system is lower than that of feed drive system, but the cutting torque is represented well by the spindle motor current. During multi-axis cutting, it is difficult to calculate the resultant cutting force using feed motor currents, because each feed force is reflected by each axis feed motor current with different time delay. It is also difficult to compensate the frictional torque using the feed motor current, because the magnitude of the frictional torque is dependent on the feedrate, table position, and cutting direction. On the other hand, cutting torque can be estimated well using spindle motor current which is independent of the cutting direction.

**Key Words** : Feed motor current (이송모터전류), Frictional torque (마찰토크), Sensitivity (민감도), Spindle motor current (주축모터전류), Time delay (시간지연)

### 1. 서론

공구동력계(tool dynamometer), AE 센서, 전류 센서, 가속도계 등 여러 가지 센서를 사용하여 절삭공정 중의 이상 현상을 감시하고 진단하는 연구가 국내외에서 활발히 수행되고 있다. 절삭공정의 이상현상을 진단하는 시스템이 갖추어야 할 조건으로는 먼저 진단 시스템의 신뢰성을 들 수 있다 즉, 정밀한 센서를 사용하여 절삭공정의 상태를 해석하는데 오차가 적어야 한다. 현재까지 절삭공정의 상태를 가장 잘 표현해주는 센서는 잡음 대 신호 비율(S/N ratio)이 높고, 주파수대역폭(bandwidth)이 넓은 공구동력계로 알려져 있다. 두 번째 조건은 실제 시스템으로의 적용가능성이다. 전류 센서는 공작기계 후면 콘트롤러 박스내에 설치되어 절삭공정에 어떠한 영향도 미치지 않으므로 실제 산업현장에 적용될 수 있다. 세 번째 조건은 시스템의 가격이 저렴해야 한다는 것이다. 위 세가지 조건을 종합해볼 때 센서의 신뢰성만 갖추어진다면 전류센

서만이 절삭공정 감시 및 진단 시스템을 위한 센서로서 유일한 대안이 될 수 있다

Figure 1에서와 같이 공구가 공작물을 절삭하면 이송축과 주축 모두에 절삭저항이 발생하고 이 저항을 이겨내면서 처음 주어진 절삭조건(이송 속도

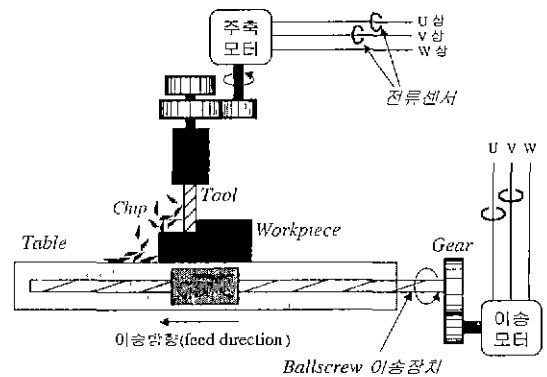


Fig.1 Schematic diagram of cutting process

및 주축 회전수)을 유지하려면 보다 많은 전류가 인입되어야 한다. 따라서 절삭력과 이송축모터 및 절삭토크와 주축모터에 인입되는 전류는 서로 상관관계가 존재하게 되고, 이송모터 전류 및 주축모터로 인입되는 전류를 측정함으로써 절삭 공정을 감시할 수 있다.

그동안 이송모터 전류 및 주축모터 전류를 이용하여 절삭공정을 감시하는 많은 연구[1,2,3]가 있었으며, 본 연구의 목적은 절삭공정 감시자로서의 이송 및 주축모터 전류의 특성을 살펴보고 각각의 장단점을 비교해봄으로써 그 한계점을 밝히는 데 있다.

## 2. 실험 장치 및 구성

실험에 사용된 공작 기계는 FANUC 3상 교류 유도 모터를 주축 모터로, 3상 동기모터를 이송모터로 채택한 수평형 머시닝센터(대우중공업 ACE-H40, 통일중공업 MCH-10)이다. 주축 및 이송축 모터의 U상 및 V상 전류의 측정을 위해 공작기계 제어판의 주축 및 이송축 모터 전원 공급선에 홀센서(hall effect current sensor)를 장착하였다. 측정된 전류 신호의 잡음을 제거하기 위하여 300 Hz의 차단 주파수를 가진 아날로그 필터를 사용하였다. 회전 공구 동력계(Kistler 9123B type)를 사용하여 절삭 토크를 측정하였으며 다채널 신호 조정기(multi-channel signal conditioner, Kistler 5223A type)를 사용하여 절삭 토크에 의한 전기적 신호를 조정하였다. 측정된 신호들은 A/D 보드를 거쳐 실험용 컴퓨터에 전달된다.

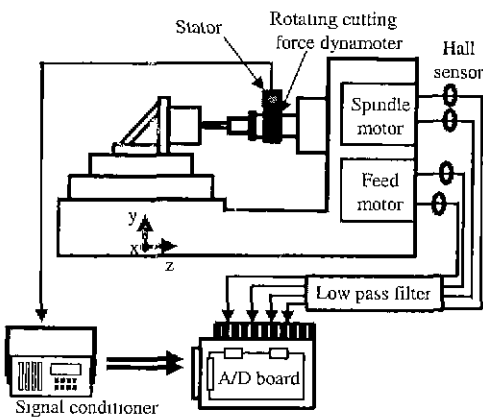


Fig.2 Schematic diagram of experimental set-up

## 3. 모터전류와 절삭토크, 절삭력

### 3.1 민감도(sensitivity)

절삭공정 중 발생하는 절삭력 또는 절삭토크의 변화에 대한 모터 전류의 추종 성능을 측정하기 위하여 드릴공정에서 주축 및 z축 이송계의 민감도를 측정하였다. 이송계의 민감도는 드릴 1회전당 z 방향 절삭력( $F_z$ )의 크기에 대한 절삭에 의한 z 방향 이송모터 전류( $I_z$ )의 크기를 평균한 값을, 주축계의 민감도는 1회전당 절삭토크( $T_c$ )의 크기에 대한 절삭에 의한 주축모터 전류( $I_s$ )의 크기의 평균값을 사용하였다. 절삭에 의한 모터전류는 전체 전류에서 공회전시의 마찰전류( $I_{tare}$ )를 뺀 값을 사용하였다.

Static sensitivity =

$$\frac{1}{rev} \sum_{i=1}^{rev} \frac{I_z[i] - I_{z,tare}}{F_z[i]} \quad (\text{In feed drive system})$$

$$\frac{1}{rev} \sum_{i=1}^{rev} \frac{I_s[i] - I_{s,tare}}{T_c[i]} \quad (\text{In spindle drive system})$$

(1)

실험결과, 이송계에서는 주축회전수가 증가함에 따라 민감도의 변화가 크지 않았으나, 주축계에서는 주축회전수 증가와 함께 감소되어 1800rpm에서는 300rpm에 비하여 약 2dB 정도 민감도가 감소되었다. 그러나 간접측정시스템에서 허용하는 민감도 저하가 3dB 임을 감안할 때[4], 이송축 및 주축모터 전류 모두 절삭공정을 감시하기에는 충분한 민감도를 가지고 있다고 할 수 있다.

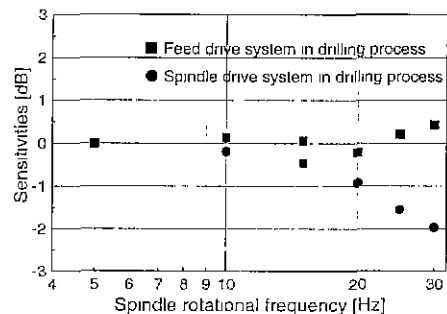


Fig.3 Static sensitivities of feed and spindle drive system in drilling process ( $\phi 10$  mm drill, 0 167 mm/rev, SM45C)

### 3.2 시간지연(time delay)

절삭 공정 중 주축 및 이송축 모터에 작용하는 전체 토크 ( $T_m$ )는 식 (2)와 같다

$$T_m)_{s,f}(t) = J_{\omega)_{s,f}} \frac{d\omega)_{s,f}(t)}{dt} + T_d)_{s,f}(t) + T_f)_{s,f}(t) \quad (2)$$

여기서  $J_{\omega)_{s,f}}$ 는 볼스크류, 너트, 테이블, 기어류 등을 포함하는 이송계 전체의 등가관성모멘트,  $J_{\omega)_{s}}$ 는 공구를 포함한 주축계 전체의 등가관성모멘트,  $\omega$ 는 모터의 각속도;  $T_d$ 는 외란 토크;  $T_f$ 는 마찰로 인해 소요되는 모터 토크를 나타낸다. 또한 모터 토크는 등가의 직류 전류( $I_e$ )와 비례 상수( $K$ )의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$T_m(t) = K \times I_e(t) \quad (3)$$

등가의 직류전류로서 본 연구에서는 3상 모터 전류의 실효값(root mean square)을 사용하였다.

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

외란 토크는 절삭력으로 인한 토크( $T_c$ )와 그밖의 잡음으로 인한 토크( $T_n$ )의 합으로 나타낼 수 있다. 절삭력은 주축계 및 이송계에서 모두 시간지연(time delay) 요소( $\Delta t_s, \Delta t_f$ )를 가지고 모터 토크로 전달되고, 이송축과 동일한 축방향의 절삭분력( $F_{x,y,z}$ )은 이송 볼스크류를 거쳐 이송축 모터로 전달된다.

$$T_d)_{s,f}(t) = T_c)_{s,f}(t - \Delta t_{s,f}) + T_n)_{s,f}(t) \quad (5)$$

$$T_c)_{x'}(t) = A_x * F_x(t) \quad (6)$$

따라서 잡음의 영향을 무시한다면 이송축 모터 전류를 이용하여 동일 축방향의 절삭분력을 다음과 같이 추정할 수 있게 된다.

$$F_x(t) = \frac{1}{A_x} [K_x I_{e_x}(t + \alpha_x) - J_{e_x} \frac{d\omega_x(t + \alpha_x)}{dt} - T_n(t + \alpha_x)] \quad (7)$$

모터 전류의 시간지연 정도를 살펴보기 위하여 정면 밀링( $\phi 100 \text{ mm}$ , 2날)으로 x축 및 y축 방향으로 절삭(600 rpm, 240 mm/min, 절삭깊이 2 mm, 절입

비 0.4)하면서 각방향 절삭력 및 절삭토크를 측정하였고, x,y 축 이송모터 및 주축모터의 실효전류( $I_{rms}$ )를 구하였다. Figure 4에 나타난 바와 같이 각 방향의 모터전류의 실효값은 동일 축방향 이송분력의 주기적인 패턴 변화를 잘 반영하였다. 그러나, y 방향 절삭력에 대한 y 방향 이송모터 전류의 시간지연( $\alpha_y$ )은 약 0.006 sec인데 반하여, x방향 절삭력에 대한 x 방향 이송모터 전류의 시간지연( $\alpha_x$ )이 약 0.045 sec

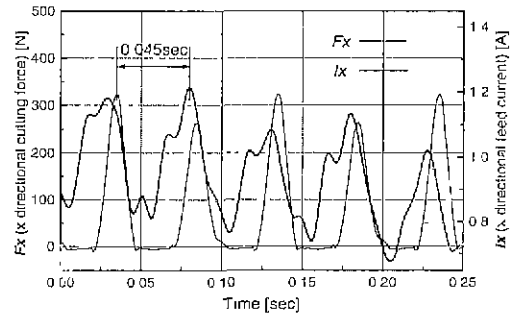


Fig. 4(a) X axis feed force and feed motor current

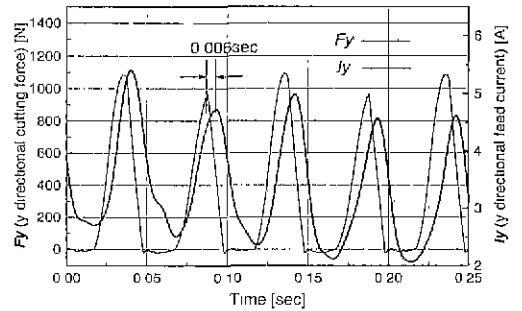


Fig. 4(b) Y axis feed force and feed motor current

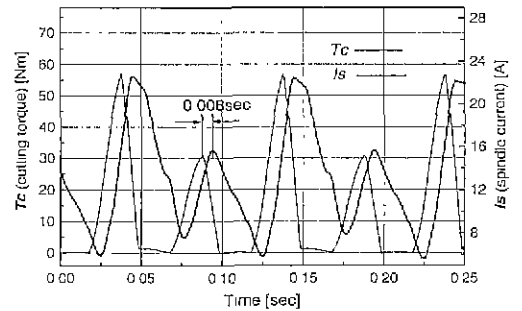


Fig. 5 Cutting torque and spindle motor current

로 서로 다르게 나타났다. 따라서 단축방향 가공을 제외한 2축 이상의 가공시 각 방향 이송모터 전류를 동기화시키기 어렵기 때문에 이송분력의 합으로 계산되는 전체 절삭력( $F_c$ )을 예측하기는 어렵다.

$$F_c(t) = \sqrt{F_x^2(t) + F_y^2(t)} \quad (8)$$

Figure 5에 나타난 바와 같이 주축모터 전류는 절삭토크의 주기적인 패턴 변화를 약 0.008 sec 시간지연을 두고 잘 반영하였다. 2축 이상의 가공시 주축모터 전류로서 절삭토크를 추정할 경우에는 이러한 시간지연 요소가 이송모터 전류와는 다르게 진혀 영향을 미치지 않으므로 1축 가공에서와 마찬가지로 안정적으로 절삭토크를 추정할 수 있다.

### 3.3 마찰토크 변화

모터 전류를 사용하여 각 방향 절삭력을 예측하기 위해서는 이송방향의 마찰력으로 인한 마찰토크 성분( $T_{fx}$ ,  $T_{fy}$ ) 및 주축계의 마찰토크 성분( $T_{fc}$ )을 실시간으로 보상해 주어야만 한다. 모터가 가감속이 없는 정상상태이고 절삭을 하지 않은 상태일 때 측정된 모터 전류는 마찰토크 성분만으로 인한 것임을 식 (2)를 통해서 알 수 있다.

Figure 6은 이송속도를 변화시켜가면서 이송계의 마찰 토크 성분을 측정 한 것이고, Fig. 7은 테이블의 이송위치에 따라 마찰 토크 성분을 측정 한 것이다. 이송속도가 200 mm/min일 때 마찰토크가 제일 작게 측정되었으며 이송속도가 증가함에 따라 마찰토크의 크기가 2배 이상 증가하였다. 이송계의 마찰토크는 테이블의 이송위치에 따라서도 크게 달라졌다. 빈번히 사용되지 않는 +x 방향의 한계지점에서는 기계원점 복귀 등 빈번히 사용되어지는 -x 한계지점에 비하여 약 40% 정도 마찰토크가 크게 나타났다. 또한 수평형 머시닝센터에서 y축 방향(중력방향)으로 이송할 때, +y 방향 이송은 절삭으로 인한 모터 토크 이외에 중력을 이기면서 주축계를 올려야하므로 -y 방향 이송에 비하여 더 큰 모터 토크를 필요로 한다.

이상에서 알 수 있듯이 이송계 마찰토크의 크기는 이송속도, 이송 위치와 절삭 방향에 따라 달라지며, 따라서 이를 실시간으로 보상하여 절삭력을 추정하기가 쉽지 않음을 알 수 있다.

Figure 8은 주축회전수를 변경시켜가면서 주축모터의 마찰전류를 측정 한 것인데, 이송속도에 따른 이송모터의 마찰토크의 변화(Fig. 6)보다도 주축회전 속도에 따른 마찰토크의 변화가 훨씬 작음을 알 수 있다. 따라서 주축모터 전류의 크기는 주축회전 속도 및 절삭토크의 크기에만 영향을 받고, 절삭방향에 관계없이 절삭토크를 예측할 수 있다. 주축회전 속도

는 공작기계 컨트롤러 박스 내의 F/V converter 단자로부터 주축회전 속도에 비례한 전압을 측정하여 알아내거나 절삭 가공 전 공회전시의 마찰 전류( $I_{tare}$ )의 크기를 배준으로써 주축회전 속도의 영향을 제거할 수 있다

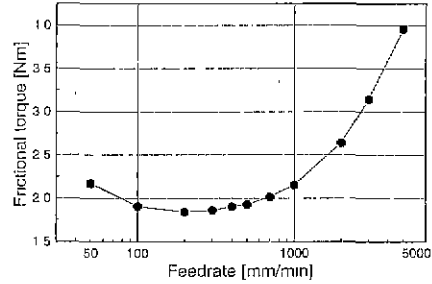


Fig.6 Frictional torque of feed drive system according to feedrate variation [MCH-10]

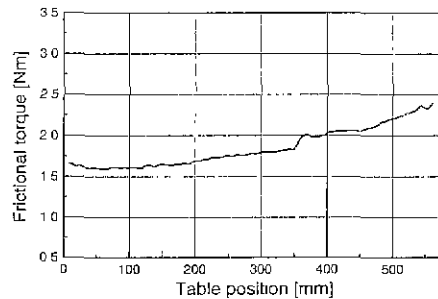


Fig 7 Frictional torque of feed drive system according to table position [MCH-10]

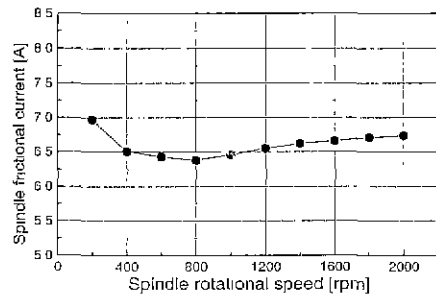


Fig.8 Frictional current of spindle drive system according spindle rotational speed [ACE-H40]

#### 4. 결론

주축모터 전류는 이송모터 전류에 비하여 민감도가 떨어지지만, 드릴과 밀링공정의 정적인 변화를 감시하고 진단하기에는 충분한 정적 민감도를 가지고 있다. 각 방향 이송분력은 서로 다른 시간지연 정도를 가지고 동일 방향 이송모터 전류에 반영되기 때문에 이송모터 전류만으로는 각 이송분력의 합으로 계산되는 전체 절삭력을 추정하기 어렵다. 또한 이송모터 전류로는 이송속도, 이송위치와 절삭방향에 따라서 마찰토크 크기가 크게 변화하기 때문에 마찰토크를 실시간으로 보상해주기 어려우며 따라서 절삭력을 추정하기 어렵다. 그러나, 주축모터 전류를 이용하면 이송위치, 절삭방향, 그리고 시간지연 요소의 영향이 제거되어 절삭토크를 실시간으로 신뢰성 있게 추정할 수 있다.

#### 참고문헌

1. Gi D. Kim, Chong N. Chu, "Indirect Cutting Force Measurement considering Frictional Behavior in a Machining Center using Feed Motor Current," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol 15, pp. 478-484, 1999.
2. Gi D. Kim, Won T. Kwon, Chong N. Chu, "Indirect Cutting Force Measurement and Cutting Force Regulation using Spindle Motor Current." The International Journal for Manufacturing Science and Technology, Vol 1, pp.46-54, 1999.
3. 오영탁, "드릴 공정에서 주축 모터 전류를 이용한 절삭 토크 제어." 서울대학교 공학박사 논문, 2001
4. A. J. Wheeler, A. R. Ganji, "Introduction to Engineering Experimentation," Prentice Hall, 1996