

## 밀링공정에서 이송모터와 주축모터의 전류신호를 이용한 절삭력 추정

### Cutting Force Estimation Using Spindle and Feeddrive Motor Currents in Milling Processes

°김 승철\*, 정 성중\*\*

\* 한양대학교 대학원 기계설계학과(Tel:+82-2-290-0444; Fax:+82-2-298-4634; E-mail:sckim@hymail.hanyang.ac.kr)

\*\* 한양대학교 기계공학부(Tel:+82-2-290-0444; Fax:+82-2-298-4634; E-mail:schung@email.hanyang.ac.kr)

**Abstracts** Advanced sensor design and filtering technology have been studied to obtain information for condition monitoring and diagnostics in machining processes. To develop an economic monitoring system in end milling processes, indirect and reliable type of cutting force estimators were required. In this paper, an estimation method of cutting forces during end milling processes was studied through the measurement of current signals obtained from spindle and feeddrive motors. Cutting force and torque models were derived from the cutting geometry in down milling processes. Relationships between motor currents and cutting forces were also developed in the form of AC and DC components from the developed force models. The validity of the cutting force estimator was confirmed by the experiments under various cutting conditions.

**Keywords** cutting mechanism, cutting force monitoring, spindle current, feeddrive current, peripheral down end milling process

#### 1. 서 론

최근의 생산공정의 무인화에 따른 지능화 요구를 만족시키기 위해서 가공공정에 대한 온라인 상태감시시스템의 구축을 필요로 하고 있다. 이와 같은 시스템에서는 가공공정의 상태를 감시할 수 있는 경제성과 신뢰성을 만족하는 센서의 개발이 필수적이다. 상태감시 연구에서 절삭력이 절삭상태를 가장 잘 반영한다고 알려져 있다. 그러나, 직접적으로 절삭력을 측정하는 공구동력계는 가장 정확하게 절삭력을 측정할 수 있기 때문에 연구목적으로는 가장 널리 사용되고 있지만, 실제로 절삭행정의 제한, 설치상의 문제, 동작기계 동특성 저하, 비용상의 문제 등으로 실용화가 어려운 실정이다. 따라서 간접적으로 절삭력을 측정하는 연구를 수행하고 있다. 이중 대표적인 방법이 구동 모터의 전류를 이용한 절삭력 추정 방법이다.

Stein[1]은 이송 모터 속도, 전류, 그리고 다른 이송시스템의 변수들로서 절삭력을 추정할 수 있는 모델을 제안하였다. Altintas[3]은 밀링공정시의 직류 이송 서보모터의 전류를 감지하여 이송 서보계의 대역폭 안에서 절삭력을 간접적으로 측정하여 공구 파괴예측에 이용할 수 있음을 보였다. 김태용[7]등은 교류 이송 서보모터 전류를 이용하여 절삭력을 추정(대역폭 약 62Hz)하고 적응제어에 응용하였다. 이러한 연구에서 일반적인 이물림 주파수가 대역폭 보다 작으며 절삭력의 동적인 특성 변화를 추정할 수 있다. 그러나 절삭방법의 변화 (up-milling, down-milling), 이송계의 불안정성(예압에 따른 마찰력의 변화), 이송방향만으로는 절삭력 추정 한계 등으로 절삭력에 대한 정적인 민감도가 낮다.

Stein[2]는 선삭시 주축 교류 유도 모터의 동력을 측정하여 절삭 상태를 감시하였다. 정성종[8] 팀과 주종남[6] 팀은 주축의 전류신호를 이용하여 평균 절삭토크를 추정하고 이송속도 적응제어에 응용하였다. 주축 모터 전류 신호는 낮은 대역폭(약 5Hz) 때문에 밀링공정에서 절삭력의 동적 변화를 예측하기는 어렵지만, 절삭방법이나 이송계의 불안정성에 상관없이 공구에 작용하

는 절삭토크의 정적인 변화에 대한 민감도가 높다.

이와 같이 기존의 연구에서는 이송계와 주축계가 따로따로 연구됨으로써 서로의 장점을 살릴 수 없었다. 본 연구에서는 이러한 이송 모터와 주축 모터의 전류 신호를 동시에 고려하여 절삭력을 간접적으로 추정할 수 있는 모델을 제시하고자 한다. 먼저 측면 하향 엔드밀 절삭공정에 대한 절삭력과 절삭토크와의 관계 모델을 구축하고, 이송 모터와 주축 모터 전류에 의해 추정된 절삭력과 절삭토크로부터 주축전류 신호는 정적인 절삭력, 이송전류 신호는 동적인 절삭력으로 표현되는 최종적인 절삭력 추정 모델을 제시하고자 한다.

#### 2. 밀링공정 절삭모델

본 연구에서는 하향절삭에 대한 절삭력 추정을 수행하였다. 하향절삭은 공구의 회전방향과 공작물의 이송 방향이 동일하므로 상향절삭과 비교해서 여유면 마모가 적고 공구수명이 길다. 절삭력이 공작물을 테이블에 밀어 붙이는 방향으로 작용하고, 또한, 테이블 이송에 요하는 소비 동력을 상향절삭보다도 적지 않게 할 수 있기 때문에 황삭가공시 유리하다.

##### 2.1. 2차원 절삭모델

Fig. 1에 하향밀링 절삭공정의 2차원 절삭 기구를 나타내었다. 절삭력은 반경방향 절삭력과 접선방향 절삭력으로 나눌 수 있으며, 일반적으로 접선방향 절삭력은 순간 칩 면적과 비절삭저항(specific cutting force)의 함수로 표현되며, 반경방향 절삭력은 접선방향 절삭력에 상수를 곱하여 얻을 수 있다[4].

$$\begin{aligned} F_r &= K_s A(\phi) \\ F_t &= r_1 F_r \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $K_s$ 는 비절삭저항으로 절삭시 평균적인 칩 두께의 함수로 표현될 수 있다.  $r_1$ 은 반경방향과 접선방향의 절삭비이다.

두 값은 실험을 통하여 구할 수 있다.  $A(\phi)$  는 순간 칩 면적으로 2차원 하향절삭에서는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$A(\phi) = a h(\phi) = a l_f \cos(k_m \phi) \quad (2)$$

여기서,  $h(\phi)$ 는 반경방향 칩두께,  $a$ 는 축방향 절삭두께이고,  $l_f$ 는 각 절삭날당 이송거리이며,  $k_m$ 는 하향절삭에 대한 수정 계수이다.

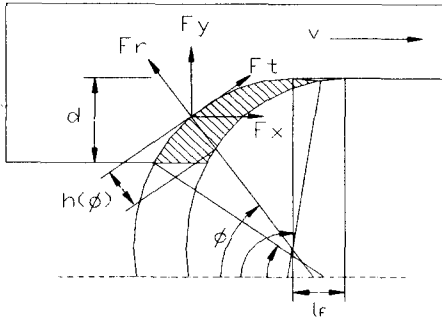


그림 1. 하향절삭시 칩두께와 절삭력

Fig. 1 Chip thickness and cutting force in down-milling

하향절삭에서 좌표변환에 의해 X방향과 Y방향 절삭력은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} F_x(\phi) &= F_t \sin \phi - F_r \cos \phi \\ F_y(\phi) &= F_t \cos \phi + F_r \sin \phi \end{aligned} \quad (3)$$

X방향과 Y방향의 절삭력의 합력을 접선방향의 절삭력이나 X방향 절삭력으로 표현하면,

$$\begin{aligned} F(\phi) &= \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \sqrt{1 + r_1^2} F_t \\ &= \frac{\sqrt{1 + r_1^2}}{\sin(\phi) - r_1 \cos(\phi)} F_x \end{aligned} \quad (4)$$

가 되고, 절삭토크는

$$T_c(\phi) = R F_t = R [F_x \sin \phi - F_y \cos \phi] \quad (5)$$

가 된다. 식(4)와 (5)로부터 절삭력의 합력과 절삭토크 사이의 관계와 X 방향 절삭력과 절삭토크사이의 관계를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$F = \frac{T_c}{R} C_r, \quad F_x = \frac{T_c}{R} C_x \quad (6)$$

여기서,  $C_r, C_x$ 는 실험을 통해 결정된다.

## 2.2. 엔드밀링의 절삭모델

Fig. 2는 엔드밀링에 의한 측면 하향절삭 구조를 보인 것이다.  $\beta$ 는 엔드밀의 비틀림각(helix angle)이고,  $t_w$ 는 공작물의 축방향 두께이며,  $d$ 는 반경방향 절삭두께이다. 순간 칩면적은 공구의 회전에 의하여 공구날에 나선상으로 분포하게 된다. 그러므로 공구날에 분포하는 순간 칩면적을 축방향 평면에 투영하면 2.1절에 제시한 반경방향 칩두께의 분포로 나타낼 수 있다. 예를 들어 절삭날의 위치가 b일 때 투영시킨 칩면적은  $\phi_a$ 에서  $\phi_b$ 까지의 칩두께를 적분하여 얻을 수 있다.

$$A(\phi) = \int_{\phi_a}^{\phi_b} h(\phi) d\phi \quad (7)$$

임의의 각도에서 공구날의 나선상의 한 점에서의 단위 축방향 길이당 접선방향과 반경방향 절삭력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f_t = \frac{K_s}{\tan \beta} h(\phi), \quad f_r = r_1 f_t \quad (8)$$

또한, 이때의 X 방향과 Y 방향 절삭력은

$$\begin{aligned} f_x(\phi) &= f_t \sin \phi - f_r \cos \phi \\ f_y(\phi) &= f_t \cos \phi + f_r \sin \phi \end{aligned} \quad (9)$$

가 된다.  $t_w$ 를 고려한 X, Y 및 접선방향 절삭력은 다음과 같다. 나선상으로 공작물과 접촉 절삭날에 의한 X 방향에 대한 절삭력  $F_x$ 는  $f_x$ 를 접촉 구간으로 적분하여 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} F_t(\phi) &= \int_{\phi_s(\phi)}^{\phi_d(\phi)} f_t d\tau \\ &= \frac{K_s l_f}{\tan \beta} \int_{\phi_s(\phi)}^{\phi_d(\phi)} \cos(k_m \tau) d\tau \\ F_x(\phi) &= \int_{\phi_s(\phi)}^{\phi_d(\phi)} f_x d\tau \\ &= \int_{\phi_s(\phi)}^{\phi_d(\phi)} (f_t \sin(\tau) - f_r \cos(\tau)) d\tau \\ &= \frac{K_s l_f}{\tan \beta} \int_{\phi_s(\phi)}^{\phi_d(\phi)} \{ \cos(k_m \tau) \sin(\tau) - r_1 \cos(k_m \tau) \cos(\tau) \} d\tau \\ F_y(\phi) &= \frac{K_s l_f}{\tan \beta} \int_{\phi_s(\phi)}^{\phi_d(\phi)} \{ \cos(k_m \tau) \cos(\tau) + r_1 \cos(k_m \tau) \sin(\tau) \} d\tau \end{aligned} \quad (10)$$

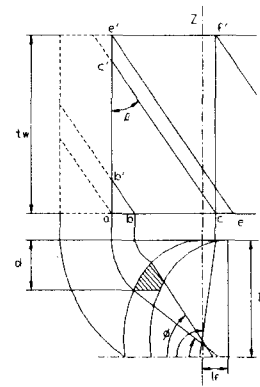
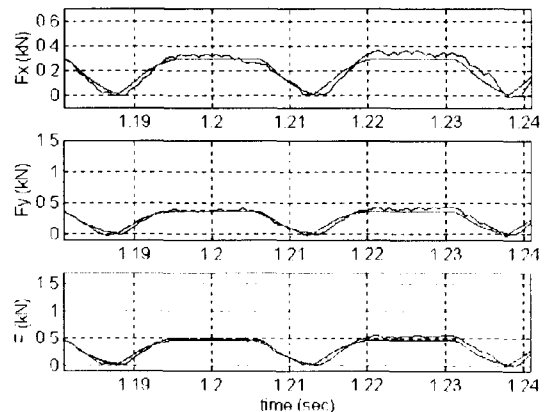


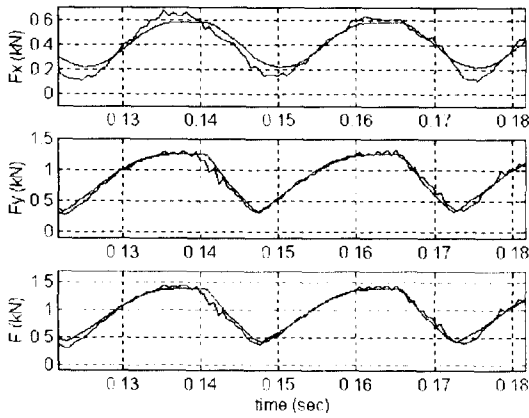
그림 2. 엔드밀링 공정에서의 절삭기구

Fig. 2 Cutting mechanism of end milling process

Fig. 3에 지름 16mm, 절삭날이 4개인 헤리컬 엔드밀을 가지고, 이송속도 200mm/min, 주축 회전속도 600rpm, 축방향 절삭두께 16mm 조건으로 반경방향 절삭두께 (a) 1mm와 (b) 3mm에 대하여 절삭 실험을 수행한 결과를 식 (10)을 이용해서 시뮬레이션한 결과와 비교한 것이다. 제시된 절삭 모델이 실험 결과와 잘 일치함을 알 수 있었다.



(a) radial depth of cut : 1mm



(b) radial depth of cut : 3mm

그림 3. 측정 및 시뮬레이션된 절삭력

Fig. 3 Measured and simulated cutting forces

### 3. 이송계 및 주축계 모터 전류와 절삭력

#### 3.1. 모터 구동 토크를 이용한 절삭력 추정

본 연구에서 머시닝센터 이송계와 주축계 교류 서보모터의 모터 전류와 모터 토크 사이의 관계식은 다음과 같이 표현된다.

$$T_M = K_t I_M \quad (11)$$

여기서,  $T_M$ 은 모터 토크의 순시값,  $I_M$ 은 모터 전류의 순시값,  $K_t$ 는 모터의 토크 상수이다.

식 (11)의 토크는 순시값이므로 실용화가 되기 위해서는 한 주기에 대한 시간 평균값으로 환산하여야 한다[9]. 이때 각상의 전류는 서보 증폭기의 체크단자에서 측정한다.

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{(I_u^2 + I_v^2 + I_w^2)}{3}} \quad (12)$$

한편, 주축계 및 이송계의 운동방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$T_c = J_e \frac{dv}{dt} + Bw + T_f + T_c \quad (13)$$

여기서,  $J_e$ 은 모터축으로 환산된 등가관성,  $B$ 는 모터 축으로 환산된 점성감쇠,  $T_f$ 는 모터 축으로 환산된 쿨롱마찰 토크,  $T_c$ 는 모터구동토크,  $T_c$ 는 외란토크 즉 절삭토크이다[3].

#### 3.2. 절삭력과 이송모터 전류 관계

X축 이송모터 전류와 X 방향 절삭력과의 정적인 관계식을 구하기 위해 점성감쇠 토크와 쿨롱마찰 토크가 절삭토크의 함수가 아니라 하면, 이들을 상수  $C$ 로 가정할 수 있다[3]. 그리고 일반적으로 절삭시에는 이송속도가 일정하게 유지되므로 식 (13)은 다음과 같이 간략화 된다.

$$K_t I_{rms} = C + K_f F_x \quad (14)$$

여기서,  $F_x$ 는 공구의 X 방향 절삭력,  $K_f$ 는 비례상수이다.

이송모터의 전류를 이용하여 절삭력을 간접 측정하기 위해서

는 절삭력의 변화에 대한 정적인 민감도와 동적인 민감도를 확인하여야 한다. 이송모터 전류에 의한 절삭력 간접 측정 시스템의 대역폭은 이물립 주파수의 변화에 따른 절삭력의 변화량과 전류의 변화량을 측정하여 구할 수 있다. Fig. 4의 실험을 통하여 본 실험에 사용한 머시닝센터는 약 60Hz의 대역폭을 가짐을 확인할 수 있었다.

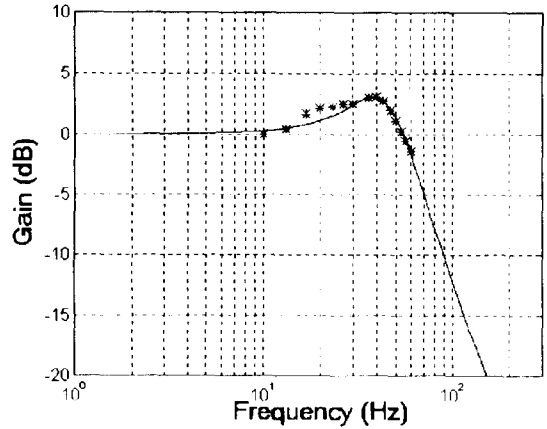


그림 4. 이송 서보 시스템의 주파수 응답

Fig. 4 Frequency response of feeddrive servo system

#### 3.3. 평균절삭토크와 주축모터 전류 관계

주축계에 대한 평균절삭토크와 모터전류와의 정적인 관계식은 이송계와 동일한 방법으로 다음과 같이 간략화 된다[8].

$$K_t I_{rms} = C + RF, \quad (15)$$

여기서,  $F_r$ 는 공구의 접선방향 절삭력,  $R$ 은 공구반경이다.

## 4. 절삭력 추정 실험

#### 4.1. 이송모터 전류와 절삭력

식 (14)의 각 상수들은 절삭방법(up-milling, down-milling, slot milling, peripheral milling 등)이나 절삭조건에 따라 변하며, 특히 이송모터에 의한 절삭력 추정에서는 단방향으로 이송할 때 이송방향만으로도 절삭력 추정의 한계로 실제 공구와 공작물에 작용하는 합력에 대한 정적인 민감도가 낮다. 그러나 이송모터 전류는 주축모터 전류에 비하여 밀링공정상의 절삭력 변화에 대해 시스템의 대역폭내에서 동적인 민감도가 높다[5]. Fig. 5는 절삭두께를 각각 달리하면서 실험한 결과로써 (b)는 이송모터와 절삭 합력에 대한 선형적 관계를 표시한 것이고, (c)는 이송모터 전류의 동적 변화량과 절삭력의 동적 변화량의 선형적 관계를 표시한 것이다. 실험 결과로부터 이송모터 전류는 절삭 합력의 변화에 대하여 정적 민감도보다는 동적 민감도가 높음을 알 수 있었다.

#### 4.2. 주축모터 전류와 평균절삭력

주축계는 낮은 대역폭을 가지므로 절삭계의 동적 특성을 제대로 반영하지 못하는 것으로 알려져 있다. 그러나, 절삭력의 합력이 모두 공구에 작용하므로 모터 전류에서 추정된 절삭토크는 합력을 반영한다. Fig. 5의 (a)는 합력과 주축모터 전류의 정적 선형관계를 나타낸 것으로 (b)의 결과와 비교하면 주축모터 전류가 이송모터 전류보다 절삭 합력의 정적인 변화에 민감도가 높음을 알 수 있었다.

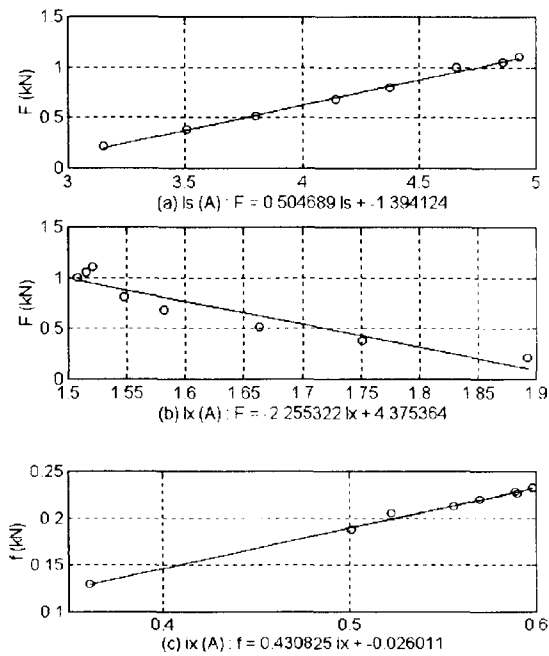


그림 5. 절삭력과 이송모터 및 주축모터 전류의 특성  
Fig. 5 Characteristics of cutting force and motor current

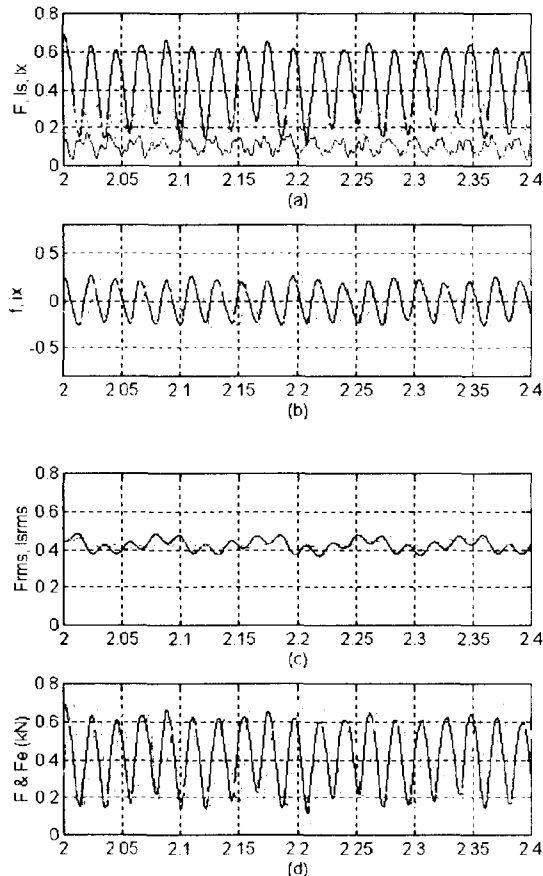


그림 6. 측정 및 추정된 절삭력  
Fig. 6 Measured and estimated cutting force  
[F(resultant force), Is(spindle current) Ix(x axis feeddrive current), Fe(estimated force), f,ix(dynamic signals) Frms, Isrms(static signals)]

### 4.3. 이송모터와 주축모터 전류 신호에 의한 절삭력 추정 실험

Fig. 5 실험 결과의 선형식을 바탕으로 각 모터전류에 의해 절삭력을 추정하고 절삭기구에서 해석된 주축계와 이송계의 절삭력 관계를 도입하여 전류로부터 절삭력을 추정할 수 있다. 주축의 전류 신호는 각 절삭날에 의하여 발생하는 동적 신호를 제거하는 저역필터(lowpass filter)에 의해 정적인 값인 평균 절삭토크로 변환되고, 이송계의 전류신호는 절삭방법이나 절삭조건 등에 무관한 각 절삭날의 변화량만을 구하기 위하여 대역필터(bandpass filter)에 의해 절삭력의 동적 변화량으로 변환된다. 이렇게 구해진 평균 절삭토크와 절삭력의 변화량은 절삭기구 해석에서 구해진 모델에 의해 최종적인 절삭력으로 추정될 수 있다. Fig. 6은 Fig. 3(b)의 실험조건에서 절삭력을 추정한 결과이다. (a)는 측정된 절삭력과 각 전류를 나타내고, (b)는 절삭력과 이송모터전류의 동적인 변화량, (c)는 절삭력과 주축모터 전류의 정적인 관계를 표시하였다. (d)는 최종적인 절삭력과 추정량의 관계를 표시하였다.

## 5. 결론

본 논문에서는 이송모터와 주축모터의 전류신호를 동시에 고려하여 절삭력을 간접적으로 추정할 수 있는 모델을 제시하였다. (1) 측면 하향 엔드밀 절삭공정에서 절삭기구 해석을 통하여 각 방향의 절삭력과 절삭토크 사이의 관계 모델을 정의하고, 실험을 통하여 비교 검증하였다. (2) 절삭력의 합력에 대하여 이송모터 전류는 동적 민감도가 높고, 주축모터 전류는 정적 민감도가 높음을 알 수 있었다. (3) 이송모터 전류신호로부터 절삭력의 동적인 변화량과 주축모터 전류신호로부터 절삭력의 정적인 변화량을 구하여 최종적인 절삭력을 구하는 방법을 제시하고, 실험을 통하여 타당성을 확인하였다.

## 참고문헌

- [1] Stein, J. L. and Park, Y., "Measurement Signal Selection and a Simultaneous State and Input observer," ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, vol.110, No.2 June, pp.151~159, 1988
- [2] Stein, J. L., and 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
- [3] Y.Altintas, "Prediction of Cutting Force and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurement", ASME Journal of Engineering for Industry, vol.114, pp386-392, 1992
- [4] Y. Altintas, I. Yellowley, "In-Process Detection of Tool Failure in Milling Using Cutting Force Models", ASME Journal of Engineering for Industry, vol. 111, pp.149-157, 1989
- [5] 권원태, "모터전류를 이용한 공작기계 이상상태 감시", '97 정밀가공 및 공작기계 부문 기술 세미나, 한국정밀공학회, pp.9-15
- [6] 김기대, 이성일, 권원태, "주축전류신호를 이용한 절삭력의 추정과 이송속도 적응제어", 한국정밀공학회 '96년도 추계학술대회 논문집, pp.150~156, 1996
- [7] 김대용, 최덕기, 주종남, 김종원, "이송모터 전류감지를 통한 절삭력의 간접측정과 절삭공정 감시 및 제어에의 응용", 한국정밀공학회지, 제 13 권, 제 2 호, pp.133~145, 1996
- [8] 안동철, 박영진, 정성중, "전류감시를 이용한 밀링공정에서의 절삭력적응제어시스템", 한국정밀공학회 '96년도 추계학술대회 논문집, pp.690~694, 1996
- [9] 정성중, 박영진, 김승철, 김창성, 양종태, 고정밀·고생산성 머신센터 줄 오차보정 기술 및 적응제어 기술의 개발, G7 첨단생산시스템 중간보고서, 세일중공업, 1994