

# 주축전류신호를 이용한 절삭력의 추정과 이송속도 적응제어

## Cutting Force Estimation and Feedrate Adaptive Control Using Spindle Motor Current

김 기대(서울대 대학원), 이 성일(서울대 대학원), 권 원태(서울시립대 정밀기계공학과),  
주 종남(서울대 기계설계학과)

Gi D. Kim (Graduate School Seoul Nat'l Univ.), Seong I. Lee (Graduate School Seoul Nat'l Univ.),  
Won T. Kwon (Dep't of Mechanical Engineering, Seoul City Univ.),  
Chong N. Chu (Dep't of Mechanical Design & Production Engineering, Seoul Nat'l Univ.)

### ABSTRACT

Static variations of cutting forces are estimated using spindle motor current. Static sensitivity of spindle motor current is higher than feed motor current. The linear relationship between the cutting force and RMS value of the spindle motor current is obtained. Using cutting force estimation, tool overload in milling process can be well detected, and cutting force is regulated at a constant level by feedrate adaptive control.

**Key words** : Cutting force(절삭력), Spindle motor current(주축 모터 전류), Static sensitivity(정적 민감도), Tool overload(공구 과부하), Feedrate adaptive control(이송속도 적응제어)

### 1. 서론

최근 제조공정의 자동화, 무인화 추세로 대기업은 물론, 중소기업까지 생산 라인의 범용 공작기계를 NC, CNC 공작기계로 대체하고 있다. 그러나 NC 코드를 잘못 생성하거나 공작물(workpiece)을 잘못된 위치로 초기 세팅(setting)하여 공구에 과도한 부하를 주어 공작물 및 공구의 파손, 채터(chatter) 등을 야기시키는 등 돌발적인 상황에 대처하지 못하는 경우가 많아, 완전한 자동화, 무인화의 생산공정 확립이 시급한 실정이다. 이러한 생산 공정 중의 예기치 못한 이상현상을 검출하고 제어하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 먼저 공구의 파손을 검출하기 위하여 Altintas 등은 절삭력 및 이송전류신호의 AR 모델을 사용하였고 [1]-[2], Takata 등은 주축의 회전속도 변화를 이용하였으며 [3], Yan 등은 절삭력과 AE신호를 사용하여 가공 중에 실시간으로 공구 파손을 검출하는 가능성을 제시하였다 [4]. 이밖에도 가공중의 이상진동인 채터나 공구의 마모 등을 검출하기 위한 연구도 국내외에서 활발히 진행되고 있

다. 절삭력을 간접적으로 추정하려는 연구로는 Stein 등이 DC 및 AC 서보 이송 모터 전류를 이용하여 절삭력 및 절삭토크를 추정하는 연구를 수행하였다 [5,6].

공구의 형태 및 공작물의 재질에 부적합하게 절삭 깊이를 과도하게 주거나 이송속도를 빨리 하면 공구에 과도한 부하가 걸려 공구가 변형되거나[7], 공구의 파손이나 채터 등 이상현상을 야기시키므로 이를 조기에 검출하고 가공조건을 적절히 변경시켜줄 필요가 있다. 이를 위해 본 연구에서는 수평형 머시닝 센터에서 주축 모터 전류신호를 이용하여 공구에 걸리는 절삭력을 추정한 뒤 공구의 과부하를 검출하고 이송속도를 변경시켜 이를 제어하는 방법을 연구하였다.

### 2. 교류서보모터에서의 등가직류전류의 도출

직류(DC)모터에서 모터의 부하는 직류전류에 비례한다. 예전에는 공작기계로 인입되는 동력원으로 직류모터를 사용하였지만, 정류자와 브러쉬와의 마찰

로 인한 열 발생 및 유지보수의 어려움 때문에 최근에는 교류(AC)서보모터를 주로 사용한다. 교류서보모터에서 직류모터와 같이 모터의 토크를 산출해내기 위해서는 3상의 교류전류를 등가한 직류전류의 성분을 도출해내야 하며 이의 방법은 다음과 같다.

### 2.1 D-Q 변환

회전전자기형 동기모터에서 회전자 좌표계를 고정자 좌표계의 D축과 Q축으로 환산하는 변환이며, 만약 3상의 완전한 정현파를 D-Q 변환시키면, D축의 전류는 0이고, 진폭의  $\sqrt{\frac{3}{2}}$  배에 해당하는 Q축의 전류가 나온다. 이의 환산 식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos n_p \theta & \cos(n_p \theta - \frac{2}{3} \pi) & \cos(n_p \theta + \frac{2}{3} \pi) \\ \sin n_p \theta & \sin(n_p \theta - \frac{2}{3} \pi) & \sin(n_p \theta + \frac{2}{3} \pi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_u \\ I_v \\ I_w \end{bmatrix} \quad (1)$$

이식에서  $n_p$  는 모터 폴(pole)의 수이고,  $\theta$ 는 영구자석 로터의 회전각이며 이는 모터로부터 인출한 엔코더로부터 정확히 구해진다. 실제로 절삭력에 의한 모터의 부하토크는 직류모터로 상사시킨 Q 성분의 전류 값과 비례관계를 가지므로 이 값의 변화를 추적함으로써 절삭력의 변화 패턴을 간접적으로 구할 수 있다.

### 2.2 자승 평균값(RMS value)

3상의 교류 전류를 식(2)와 같이 간단한 방법으로 자승 평균하여 등가의 직류전류로 환산하는 방법이다 [8]

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

주축모터전류와 같이 엔코더가 부착되어있지 않을 때에는 로우터의 정확한 회전각을 알 수 없기 때문에 주축모터에서의 모터토크를 알기 위해서는 자승 평균값으로 직류전류 값을 산출해내야한다. 그리고 이 방법은 매우 간단하기 때문에 산업현장에서 널리 쓰이고 있으며, 또한 절삭 공정이 정상상태(steady-state)일 때는  $I_{rms}$  전류에서  $\sqrt{3}$ 을 곱하면  $I_q$  전류가 된다.

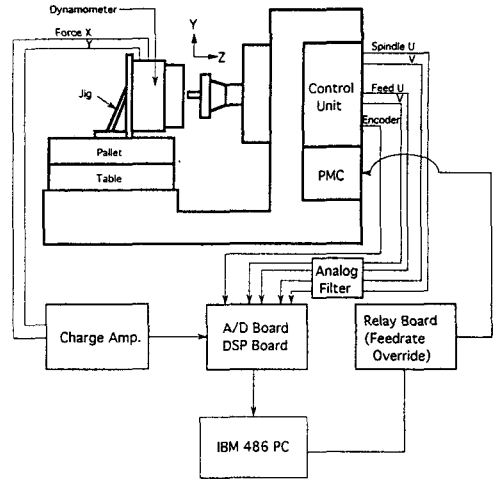


Fig. 1 Experimental set-up

## 3. 실험장치 및 구성

### 3.1 머시닝센터 및 데이터 습득장치

실험에 사용된 머시닝센터는 통일중공업(주)의 수평형 머시닝센터 (모델:MCH-10)이며, AD2200보드와 TMS320C32 DSP보드를 사용하여 주축 모터 전류신호, 이송 모터 전류 신호와 엔코더 신호를 측정하였고, 공기동력계로 x, y 방향 절삭력 신호를 측정하여 전류신호와 절삭력 신호와의 상관관계를 규명하였으며, 전체 구성도는 <그림 1>과 같다.

### 3.2 홀센서 및 아날로그 필터

주축 모터와 이송모터의 전류를 측정하기 위하여 홀센서(Hall sensor)를 사용하였다. 이러한 홀센서는 기계자체의 회로 및 절삭계에 영향을 미치지 않고 전류를 측정하여 기계의 상태를 간접적으로 감시할

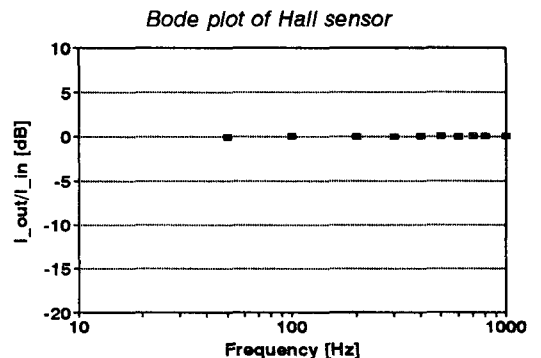


Fig. 2 Bode plot of hall sensor

수 있으며 비용이 저렴하다는 장점을 가지는 반면, 전자기유도현상을 이용한 것이므로 주파수 대역에 제한을 받을 수 있다는 단점을 가지고 있다. 이에 전류소스(Current source)를 사용하여 센서의 주파수 대역(Bandwidth)을 구하였다(그림 2). 실험결과 1kHz까지 주파수대역에 아무런 문제가 없었으며, 실제 실험에서는 차단주파수(cutoff frequency)가 200Hz인 아날로그 필터를 사용하여 고주파수의 노이즈를 제거하였다.

### 3.3 이송속도 적응제어를 위한 DSP보드 및 PMC 제어판의 구성

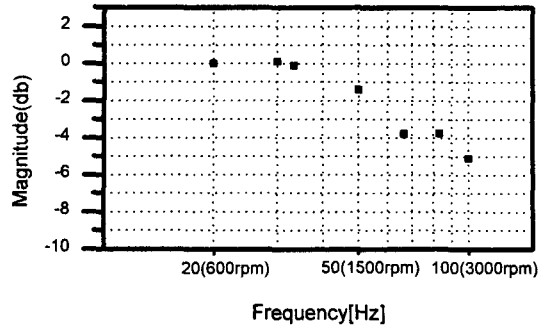
이송속도를 제어할 수 있도록 머시닝센터 CNC컨트롤러 내의 PMC 프로그램을 변경하여 PC 내의 DSP 보드 DIO 포트를 통해 CNC 컨트롤러내의 이송속도 Override(0%-256%) 단자를 제어하여 이송속도를 제어하였다. 이송속도 제어에 필요한 전압(24V)을 위해 릴레이(Relay) 보드를 중간에 사용하였고, 이 전압은 CNC 컨트롤러 단자에서 끌어들었다. (그림 1. 참조)

## 4. 절삭력의 간접측정 및 이송속도 적응제어

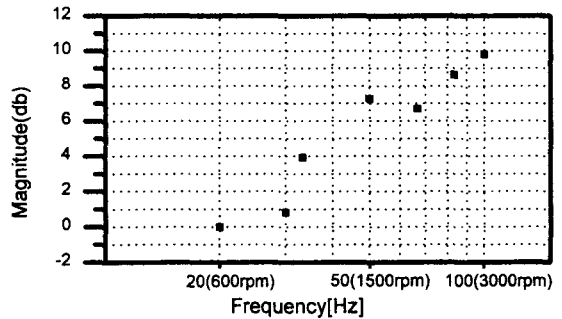
### 4.1 이송전류, 주축전류의 정적 민감도

일반적으로 이송 모터 전류 신호의 주파수 대역폭(Bandwidth)은 일반적인 절삭 공정의 이물림 주파수(tooth passing frequency)보다 높다고 알려져 있고, 주축 모터 전류 신호는 공구에 직접 걸리는 절삭력에 의한 토크가 주축과 기어, 벨트 전달 장치부를 경유함으로써 변형된 전달토크가 부하토크로서 인가됨으로써 5Hz 미만의 낮은 주파수 대역폭을 가지고 있어 절삭계의 동적 특성을 제대로 반영하지 못하는 것으로 알려져 있다[9]. 그러나 최근 고정밀 공작기계에서의 주축 모터는 기어나 벨트장치가 없는 내장형 모터(Built-in motor)를 사용하거나, 주축계의 강성이 높아져 주파수 대역폭이 상당히 높아지고 있는 추세이다.

공구의 파손 등과 같은 순간적인 변화를 수반하는 패턴을 검출하기 위해서는 주파수 대역폭이 대단히 높은 센서를 사용하여 신호의 동적인 특성 변화를 측정해야할 필요성이 있다. 그러나 과도한 절삭력으로 인한 공구의 과부하 등과 같은 정적인 증가량을 측정하기 위해서는 동적인 특성 변화의 측정은 그리 중요하지가 않다. 마찬가지로 모터 전류로 공구의



(a) Static sensitivity ( $I_f/F_x$ ) of feed motor current



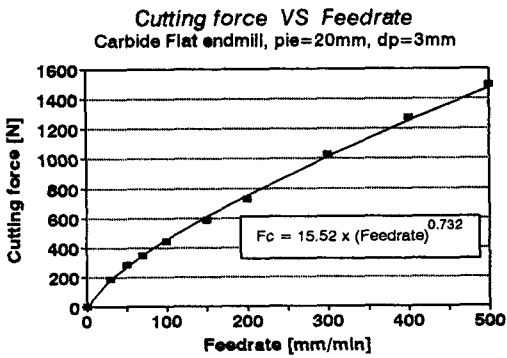
(b) Static sensitivity ( $I_s/F_c$ ) of spindle motor current

Fig. 3 Static sensitivity variations of feed & spindle motor

파손을 검출하기 위해서는 절삭력의 패턴이 잘 반영될 수 있는지를 판가름하는 센서의 동적 민감도(Dynamic sensitivity)가 상당히 중요하나 공구의 과부하를 검출하기 위해서는 동적인 민감도보다는 절삭력의 증가가 곧 모터 전류의 증가로 나타나는 센서의 정적민감도(Static sensitivity)가 더 중요하다. 그림 3은 주축의 회전수(rpm)를 변화시켜가면서 이송분력( $F_x$ )의 변화에 대한 이송전류( $I_f$ )의 변화의 비, 절삭력( $F_c$ )의 변화에 대한 주축전류( $I_s$ )의 변화의 비를 나타낸 것이다. 주축의 회전수가 증가함에 따라 이송 모터 전류 신호로서는 절삭력의 정적인 변화를 추정할 수 없지만, 주축 모터 전류 신호로는 절삭력의 정적인 증가량을 잘 추정할 수 있음을 보이고 있다. 즉, 주축전류가 이송전류보다 절삭력의 정적인 변화에 대해 정적 민감도가 높음을 알 수 있다.

### 4.2 이송속도 변화에 대한 절삭력 및 주축 전류의 변화

그림 4는 평엔드밀(Flat endmill)로 공작물 SM45C를 가공할 때 이송속도를 변화시켜가면서 절삭력의 정적인 변화에 대한 주축 전류의 RMS 값의 변화를



(a) feedrate VS cutting force

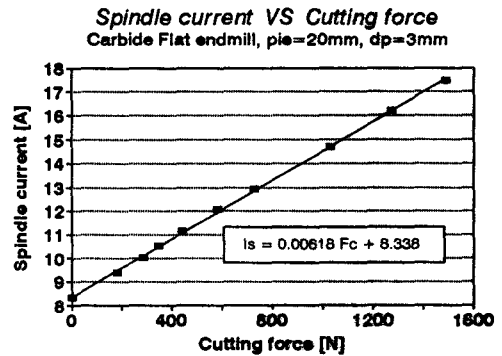
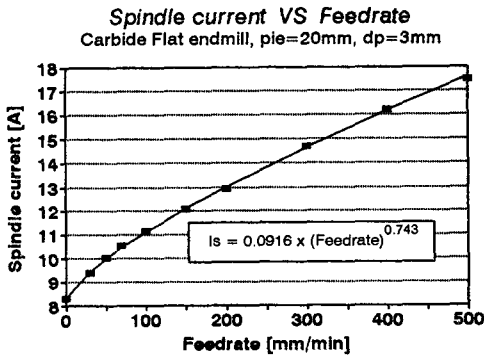


Fig. 5. Relationship between cutting force & spindle motor current



(b) feedrate VS spindle motor current

Fig. 4 Relationship between feedrate & cutting force, spindle motor current

나타낸 것이다. 여기서 절삭력의 정적인 변화에 대한 주축전류의 정적인 변화와의 관계를 살펴보기 위해 절삭력 및 주축 전류의 RMS 값은, 아날로그 및 디지털 필터를 통해 각 신호의 노이즈를 없앤 후, 각 이송속도에 대해 공구 1회전시 최대 절삭력 및 최대 RMS 값의 평균값을 사용하였다. 이송속도와 절삭력과의 관계는 Devor 등이 제시한 바와 같이 이송속도에 대해 절삭력이 지수함수의 형태로 나타났고[10], 주축전류의 RMS 값도 절삭력의 변화 형

태와 마찬가지로 이송속도에 대해 지수함수의 형태로 나타났다. 절삭력과 주축 전류의 RMS 값은 선형적인 관계로 나타났다(그림 5).

#### 4.3 공구의 과부하 검출 및 이송속도 적응제어

공구에 과도한 절삭력이 걸리면 공구 및 절삭계에 무리가 가해져 채터가 발생하거나 심하면 공구가 파손되기도 한다. 그러므로 완전한 FMS, CIM 시스템의 구축을 위해서는 공구의 과부하를 조기에 검출하고 이를 조절하는 기능이 필수적이다. 공구 과부하의 기준을 공구에 걸리는 과도한 절삭력에 두었으며, 공구에 과도한 절삭력이 부하되면 이송속도를 제어하여 절삭력을 조절하였다.

주축 모터 전류 신호를 측정하여 절삭력을 추정하고 이를 이용하여 이송속도를 제어하는 시스템의 전체적인 블록선도는 그림 6과 같다.

그림 6을 살펴보면 먼저, 이송속도의 지령치에 따라 이송 모터에 증폭기를 통해 전압이 인가되어 이송 모터의 회전수가 결정되면 기계적인 결합부를 통해 이송속도가 결정된다. 결정된 이송속도와 다른 절삭조건으로 절삭공정이 이루어지면 절삭력으로 인한 주축모터의 전류의 증가치가 발생한다. 이를 측정하여

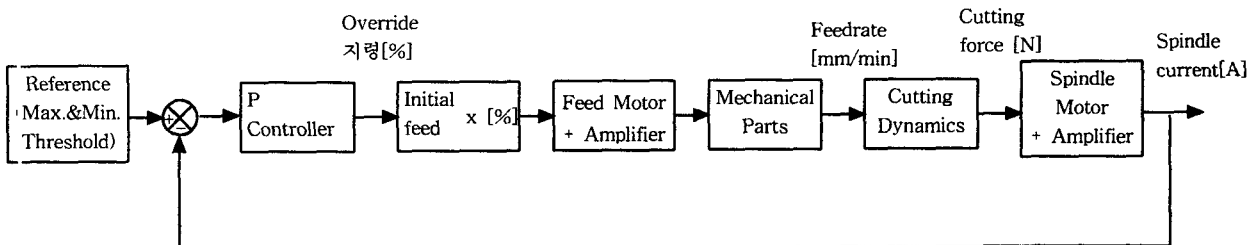
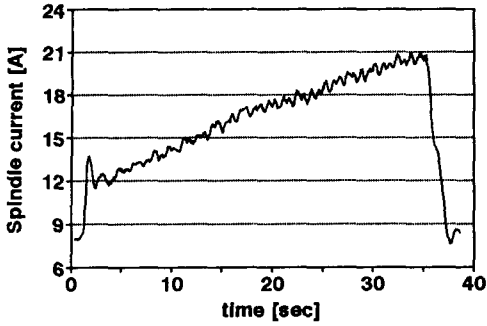


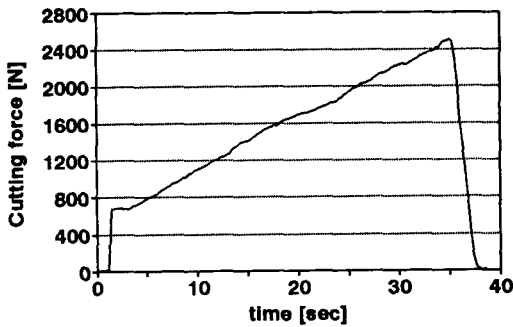
Fig. 6 Block diagram of feedrate adaptive control

**Spindle current variations**  
depth of cut : 1mm --> 5mm



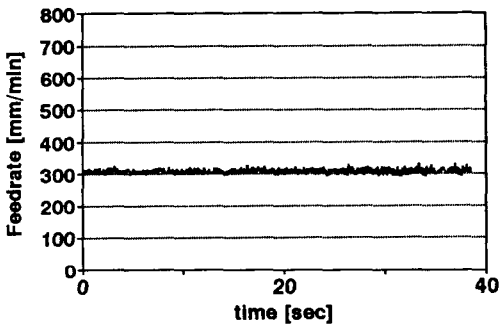
(a) Spindle current variations

**Cutting force variations**  
depth of cut : 1mm --> 5mm



(b) Cutting force variations

**Feedrate variations**  
depth of cut : 1mm --> 5mm



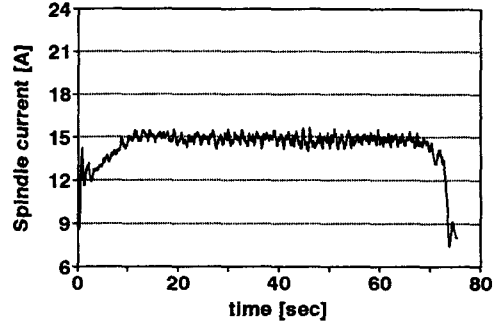
(c) Feedrate variations

Fig. 7. In case of taper cutting  
(When feedrate is not controlled)

주축모터 전류의 최대, 최소 한계치(Threshold)와 비교한 뒤, 오차(error)에 비례한 만큼의 이송속도를 가감해 주는 비례제어(Proportional Control)를 해주었다.

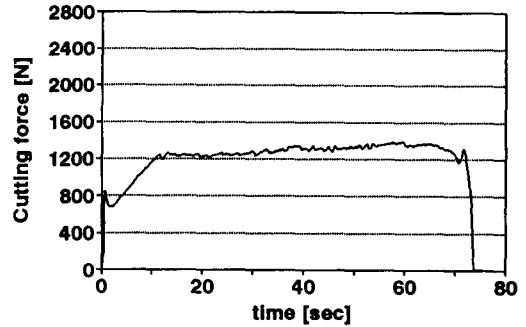
그림 7과 그림 8은 공작물(SM45C)을 테이퍼

**Spindle current variations**  
depth of cut : 1mm --> 5mm



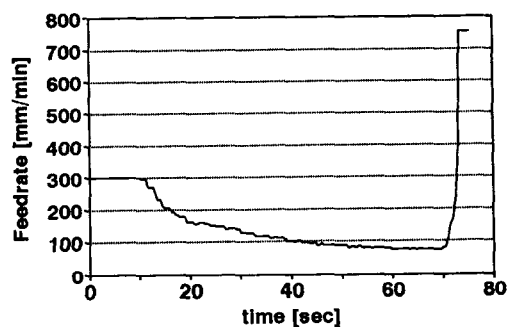
(a) Spindle current variations

**Cutting force variations**  
depth of cut : 1mm --> 5mm



(b) Cutting force variations

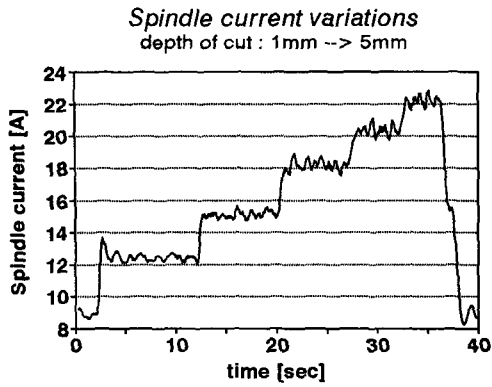
**Feedrate variations**  
depth of cut : 1mm --> 5mm



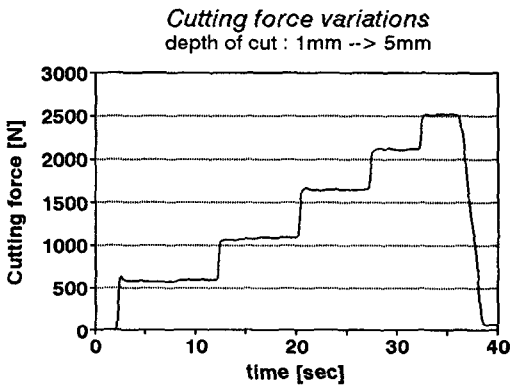
(c) Feedrate variations

Fig. 8. In case of taper cutting  
(When feedrate is controlled)

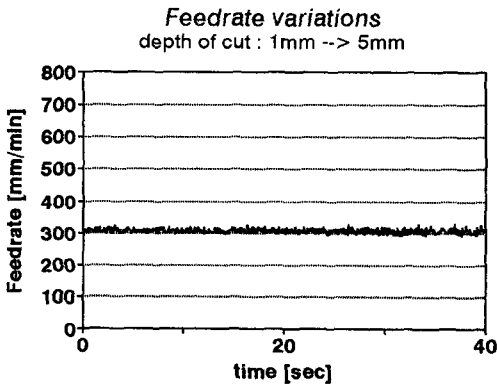
(taper)로 가공하여 절삭깊이를 1mm에서 5mm까지 선형적으로 증가시켜가며 절삭하면서, 각각 이송속도를 제어하였을 때와 제어하지 않았을 때 절삭력, 주축모터의 전류, 이송속도의 변화를 나타낸 것이고, 그림 9와 그림 10은 공작물을 스텝(step)으로 가공



(a) Spindle current variations



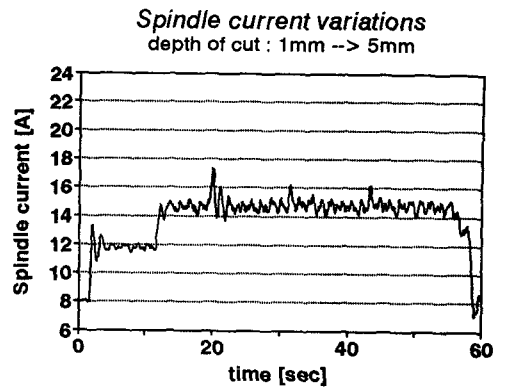
(b) Cutting force variations



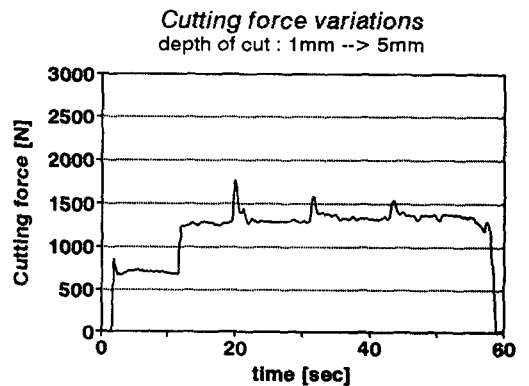
(c) Feedrate variations

Fig. 9. In case of step cutting  
(When feedrate is **not** controlled)

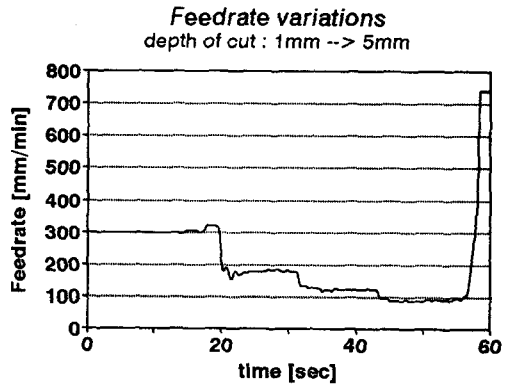
하여 절삭하였을 경우이다. 공작물의 형상이 어떠한 경우여라도 이송속도를 제어함으로써 일정한 절삭력으로 제어되고 있음을 보여주고 있고, 마지막 엑시트(exit)가공시에는 이송속도가 증가하여 절삭시간을 단축시키고 있음을 보여주고 있다.



(a) Spindle current variations



(b) Cutting force variations



(c) Feedrate variations

Fig. 10. In case of step cutting  
(When feedrate is **controlled**)

## 5. 결론

완전한 FMS, CIM 시스템의 구축을 위해서 밀링 공정의 자동화는 필수적이며, 이를 위해 이송 모터 전류 신호 대신에 정적 민감도가 높은 주축 모터의 전류를 사용하여 절삭력의 정적인 증가를 간접적으로 추정하여, 공구의 과부하를 조기에 검출하였으며, 이와 동시에 이송속도를 적응제어하여 절삭공정의 과부하를 방지하고, 공구의 파손과 채터의 발생 등을 미연에 방지하였다. 이의 방법으로 공구 1회전당 주축 모터 전류의 RMS 피크치의 평균값과 절삭력의 피크치의 평균값과의 선형적인 관계를 구하여 주축전류가 정해진 최소, 최대 한계치 내에서 절삭 공정이 이루어지도록 이송속도를 제어하였다.

## 참고문헌

[1] Y. Altintas, I. Yellowley, J. Tlustý, "The Detection of Tool Breakage in Milling Operation," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 110, 1988, pp. 271-277

[2] Y. Altintas, "Prediction of Cutting Forces and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurements," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 114, 1992, pp. 386-391

[3] S. Takata, T. Nakajima, J.H. Ahn, T. Sata, "Tool Breakage by Means of Fluctuations in Spindle Rotational Speed," *Annals of the CIRP*, Vol. 36, 1987, pp. 49-52

[4] D. Yan, T.I.E-Wardany, M.A. Elbestawi, "A Multi-Sensor Strategy for Tool Failure Detection in Milling," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 35, 1995, pp. 383-398

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

[6] J.L. Stein, C.H. Wang, "Analysis of Power Monitoring on AC Induction Drive Systems," *ASME Journal of Dynamic Systems Measurement*

and Control, Vol. 112, 1990, pp. 239-248

[7] E. Budak, Y. Altintas, "Modeling and Avoidance of Static Form Errors in Peripheral Milling of Plates," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 35, 1995, pp. 459-476

[8] 김기대, 조현우, 주종남, "이송전류신호를 이용한 이송계의 마찰특성에 관한 연구," *한국정밀공학회 추계학술대회 논문집*, 1995, pp. 249-253

[9] K. Matsushima, P. Bertok, T. Sata, "In-Process Detection of Tool Breakage by Monitoring Spindle Motor Current of a Machine Tool," *Measurement and Control for Batch Manufacturing, The Winter Annual Meeting of ASME*, Phoenix, Arizona, 1982, pp. 14-19

[10] W. A. Kline, R. E. Devor, and J. R. Lindberg, "The Prediction of Cutting Forces in End Milling with Application to Cornering Cuts," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.* Vol. 22, No. 1, 1982, pp. 7-22

[11] J. M. Lee, D. K. Choi, J. Kim, C. N. Chu, "Real-Time Tool Breakage Monitoring for NC Milling Process," *Annals of the CIRP*, Vol. 44, 1995, pp. 59-62

[12] 김태용, 최덕기, 주종남, 김종원, "이송모터 전류 감지를 통한 절삭력의 간접측정과 절삭공정 감시 및 제어에의 응용," *한국정밀공학회지* 제13권 제2호 (1996년 2월), pp. 133-145