

절삭력 간접 측정을 이용한 CNC공작기계 제어

송진일*, 손주형**, 권동수***, 김성권****

Control of a CNC Machining Center Using the Indirect Measurement of the Cutting Force

J.I. Song*, J.H. Son**, D.S. Kwon***, S.K. Kim****

ABSTRACT

In recent manufacturing process, the increase of productivity has been attempted by reducing machining time with the increase of cutting force. However, the excessive increase of cutting force can cause tool breakage and have a bad effect on both manufacturing machine and workpiece. Thus, it is necessary to estimate and control the cutting force in real time during the process. In this study, use of disturbance observer is proposed for the indirect cutting force estimation. The estimated cutting force is used for the real-time control of feedrate, making the actual cutting force follow the reference force command. Since the suggested method does not need an expensive sensor like a dynamometer, the method is expected to be used practically. Since the actual cutting force follow the reference force, resulting the reducing of the machining time the increase of productivity are also expected, and the quality of cutting surface has been improved due to the adjusted feedrate. Besides, an actual constant cutting force guarantees the prevention of tool breakage. To show the effectiveness of the suggested cutting force control method, an experimental setup has been made without sensor and applied to several workpieces. Experiments show that the suggested method is effective to cutting force control of a CNC machining center.

Key Words : Disturbance Observer(외란 관측기), Cutting Force Control (절삭력제어),
Cutting Force Estimation,(절삭력 추정) Feedrate Control(이송속도제어)

1. 서 론

기계 가공 현장에 지난 십년 간 CNC 공작기계의 보급으로 생산성과 정밀도의 향상을 가져왔지만 실제 가공현장에서는 숙련된 작업자나 프로그래머가 가공경험에 의

존하여 최악의 경우를 가정한 이송속도나 주축속도를 선정하여 절삭조건을 결정하기 때문에, CNC 공작기계가 낼 수 있는 최대의 출력을 사용할 수 없게 되어 생산성의 저하를 가져오는 요인으로 지적되고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 가공상태에 따라 적절한 절삭조건을 은

* 한국과학기술원 자동화및 설계공학과
** 대우자동차 생산기술 연구소
*** 한국과학기술원 기계공학과
**** 삼성전자 생산기술 센터

라인으로 결정하는 연구가 활발히 진행 되어왔다.

즉 정해진 절삭력을 유지하는 범위 내에서 절삭속도를 극대화 하는 연구를 들 수 있다. L.K. Lauderbaugh 등은 공구동력계에서 측정된 절삭력을 바탕으로 한 밀링작업 시의 모델참조적응제어기를 제안하였고⁽¹⁾, M.A. Elbestawi 등은 공구동력계와 절삭공정모델을 이용하여 절삭력을 측정, 이를 밀링작업에 이용하였으며⁽²⁾, L. Liu 등은 CNC 밀링 가공에 공구동력계를 도입한 적응제어 알고리즘을 적용하였다.⁽³⁾ 또한 Y. Altintas는 밀링 공정에서 이송모터의 구동전류를 이용하여 간접적인 절삭력 측정과 공구 파손을 예측할 수 있다고 하였고⁽⁴⁾, J.M. Lee 등은 NC 밀링 작업 시에 교류 서보모터에 흐르는 전류를 이용해서 절삭력을 간접적으로 제어하여 공구 파손의 사전 방지를 제시하였으며⁽⁵⁾, T.Y.Kim 등은 CNC 밀링 공정에서 절삭 시에 걸리는 전류의 측정을 이용하여 이송물을 조정, 실제 절삭력이 기준 절삭력을 추종하도록 하였다⁽⁶⁾. 그러나, 기존의 연구가 절삭력의 측정시 공구동력계(Dynamometer)를 이용하여 절삭력을 직접 측정하거나 이송축 모터에 흐르는 전류를 측정하여 간접적으로 절삭력을 측정하고 있다. 공구동력계를 사용하는 경우 가격이 고가이고, 절삭스트로크의 제약, 절삭유를 급유하지 못하는 등 여러 가지 문제점으로 인해 연구차원에서 사용하는 데는 별 문제점이 없으나 실제산업 현장에서 적용하는 데는 많은 문제점을 갖고 있다. 또한 이송축 모터에 흐르는 전류의 측정을 이용한 방법에서는 모터의 가감속에 쓰이는 전류 성분까지 절삭력으로 간주하기 때문에 1차원 가공에서는 가감속 시간이 상대적으로 가공시간 보다 매우 짧기 때문에 별문제가 없으나 다차원 절삭인 경우, 예를 들어 원호 가공 시 X축과 Y축은 각각 정현파 형태의 속도를 갖기 때문에 모터에 흐르는 전류도 정현파 형태로 된다. 따라서 모터의 속도 변화가 전 절삭과정에 나타나기 때문에 전류에 의한 절삭력 측정은 속도 변화량에 따라 오차가 발생하게 되고, 고속 가공일 경우 각축의 속도 변화가 크기 때문에 절삭력 측정 오차가 증가 하는 단점을 갖고 있다고 생각된다. 또한 기존의 연구는 상용화된 CNC제어기 외부에 전류센서(예를들면 홀센서)를 사용하고 또한 이를 처리하는 별도의 하드웨어장치가 필요하기 때문에 상용화시 비용이 증가하는 요인으로 작용한다. 본 논문에서는 기존의 일률적 이송률 하에서의 가공에서 보다 나은 생산성 향상을 위한 하나의 방편으로 외란 관측기를 밀링 공정의 이송축 시스템에 적용하여 가공시의 절삭력을 외란으로 간주하여 추정하는 절삭력 간접

측정 방법에 의한 고가의 센서를 필요로 하지 않는 절삭력 제어 시스템의 구현을 제시하고 제안된 절삭력 시스템의 타당성을 보이고자 한다.

2. 절삭력 간접 측정 시스템

2.1 외란 관측기에 의한 절삭력 간접 측정 원리

한 개의 이송축 시스템에서 모타축 환산 관성 모멘트를 $J[kgm^2]$ 모터에 인가하는 토크를 $T_m[Nm]$, 부하토크를 $T_l[N_m]$ 라 하고 모터의 속도를 $\omega[rad/sec]$ 라하면, 다음과 같이 모타구동 토크와 부하 토크 간의 관계가 성립 한다.

$$J \frac{d\omega}{dt} + T_l = T_m \quad (1)$$

이때 부하 토크 T_l 은 아래와 같이 3개의 성분으로 분류할 수 있다.

$$T_l = T_{ext} + (F + D\omega) \quad (2)$$

여기서 T_{ext} 는 가공중에 모타축에 작용하는 외란이고, F 는 쿨롱 마찰, D 는 점성 마찰 계수이다. 모타 토크 T_m 은 모터에 흐르는 전류 $I[A]$ 와 모터의 토크 상수 $K_t[Nm/A]$ 의 곱으로 표시되므로 아래의 식이 성립한다.

$$T_m = K_t I \quad (3)$$

따라서 식(1)은 아래와 같이 표시할수 있다.

$$J \frac{d\omega}{dt} = K_t I - (T_{ext} + F + D\omega) \quad (4)$$

여기서 실제 시스템의 관성 모멘트와 토크 상수의 값과 모델링에 의한 관성 모멘트와 토크 상수와의 차이를 각각 ΔJ , ΔK_t 라하고, 모델링에 의한 관성 모멘트와 토크 상수를 각각 J_n , K_{tn} 이라 하면 외란 토크를 아래와 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} T_{dis} &= T_l + \Delta J \frac{d\omega}{dt} - \Delta K_t I \\ &= T_{ext} + F + D\omega + (J - J_n) \frac{d\omega}{dt} - (K_t - K_{tn}) I \end{aligned} \quad (5)$$

따라서 식(1)을 외란 토오르크로 표시하기위해 다시 쓰면 아래와 같이 된다.

$$(J_n + \Delta J) \frac{d\omega}{dt} = (K_m + \Delta K_t)I - T_l \quad (6)$$

식(5)를 식(6)에 대입하면 아래의 식이 성립한다.

$$J_n \frac{d\omega}{dt} = K_m I - T_{dis} \quad (7)$$

식(5)로 부터 알 수 있듯이 외란 토오르크는 모델링 에러, 마찰력, 절삭력의 합으로 표시된다. 따라서 모델링 오차가 없고 마찰력을 무시 할수 있다면 외란 토오르크를 추정하여 절삭력을 간접 측정할 수 있음을 알수 있다.

2.2 절삭력 간접 측정을 위한 외란관측기의 설계

이송축 시스템의 속도와 외란으로 간주되는 절삭력을 상태변수로 놓고 전류를 입력으로 하고, 외란이 샘플링 시간에 비해 느리게 변한다고 가정하면 아래와 같은 이산 시간 상태방정식을 세울 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{T}{J} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{TK_t}{J} \\ 0 \end{bmatrix} u(k) \quad (8)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix}$$

여기서

- $x_1 = \omega(\text{velocity})$
- $x_2 = T_{dis}(\text{disturbance})$
- $u = I(\text{current})$
- $T = \text{samplingtime}$
- $y = \text{output(velocity)}$

이다. 따라서 이산 시간에서의 최소차원 관측기(reduced order observer)의 식은 아래와 같다.

$$\tilde{\eta}(k+1) = (1 + ke \frac{T}{J_n})\tilde{\eta}(k) + (K_e^2 \frac{T}{J_n})y(k) - \frac{TK_e K_t}{J} u(k) \quad (9)$$

$$\hat{x}_2(k) = \tilde{\eta}(k) + K_e x_1(k), \quad K_e : \text{observer gain} \quad (10)$$

관측기의 오차 방정식은 다음과 같다.

$$e(k+1) = (1 + \frac{K_e T}{J_n})e(k) \quad (11)$$

원하는 특성방정식을 만족하는 관측기의 이득 K_e 는 극점 배치 방법을 하여 구하였다. 그림1에 식(9),(10)을 이용한 이산시간에서의 최소차수 외란 관측기의 블록선도를 나타내었다.

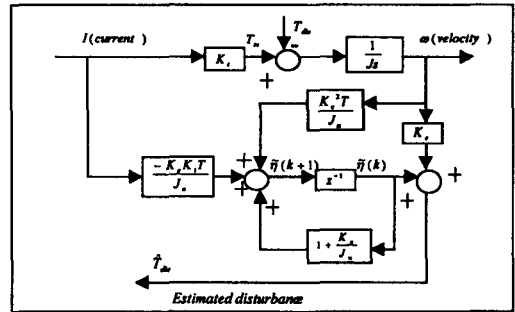


Fig. 1 Block Diagram of the disturbance observer in the discrete time domain

2.3 순환최소자승법에 의한 모델링 파라미터의 추정

앞에서도 언급했듯이 외란 관측기의 출력은 모델링 오차를 포함하고 있기 때문에 정확한 절삭력 추정을 위해 정확한 모델링이 필요하다. 이를 위해 등가의 관성 모멘트를 순환 최소 자승법에 의해 추정하여 사용하였다. 본 논문에서 대상이 되는 이송축 시스템은 삼성전자의 FARA RCM4A 직교 로봇으로서 그림 2와 같이 Z축 수직 링크와 스피들 모터, 스피들 모터의 부착을 위한 모터 베이스의 조합이 Y축 볼스크류와 모터에 결합되어 있는 것으로, 이들 질량이 이루는 등가의 관성모멘트를 구하는 것이 외란관측기에서 절삭력을 추정하는 중요한 역할을 하게 된다. 여기서는 이송축 모터의 등가 관성모멘트를 구하기 위해 순환최소자승법을 이용하였다.⁽⁶⁾ 서보모터의 이산시간 모델은 식 (12), (13)과 같이 설정가능하며, 식 (12)에서 식(13)을 빼면 식(14)가 얻어진다.

$$J \cdot \alpha[k] = K_t \cdot I(k) - T_{dis}[k] \quad (12)$$

$$J \cdot \alpha[k-1] = K_t \cdot I(k-1) + T_{dis}[k-1] \quad (13)$$

$$J \cdot \Delta\alpha[k] = K_t \cdot \Delta I(k) + \Delta T_{dis}[k] \quad (14)$$

여기서 α 는 모터의 가속도 이다.

외란 T_{dis} 가 한 샘플링 주기에 비해 느리게 변한다고 가정하면 ΔT_{dis} 를 랜덤 노이즈로 볼 수 있다.

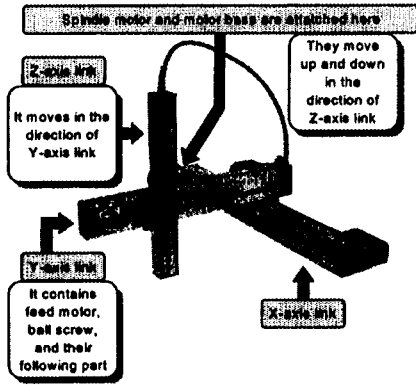


Fig. 2 Cartesian robot (FARA RCM4A)

이제 식 (14)에서 순환최소자승법을 이용하여 관성모멘트를 구하기 위해 먼저, 최소화시킬 목적함수를 다음과 같이 정의한다.

$$f(J) \equiv \sum_{k=1}^M \lambda^{M-k} (J \cdot \Delta\alpha[k] - K_i \cdot \Delta I[k])^2 \quad (15)$$

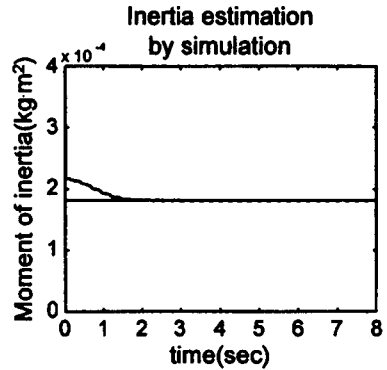
식 (15)에서의 λ 는 망각지수이며, 0에서 1사이의 값을 갖는다.⁽⁹⁾ 망각지수란 순환최소자승법에서 계산된 이전 값보다 이후에 계산되는 나중 값에 가중치를 두기 위해 도입되는 지수이다. 망각 지수의 선택은 시간에 따라 변화하는 파라미터를 추종하는 능력과 파라미터 변화시에 발생하는 노이즈에 대한 민감도 사이에서 트레이드 오프에 의해 시행착오를 거쳐 결정되는 것이 일반적 사항이다. 한편, 식 (15)의 목적함수를 최소화하는 J 의 추정치 \hat{J} 을 구하기 위한 순환추정식은 식 (16)와 (17)과 같이 표현된다⁽⁸⁾.

$$P[k] = \frac{P[k-1]}{\lambda + P[k-1](\Delta\alpha[k])^2} \quad (16)$$

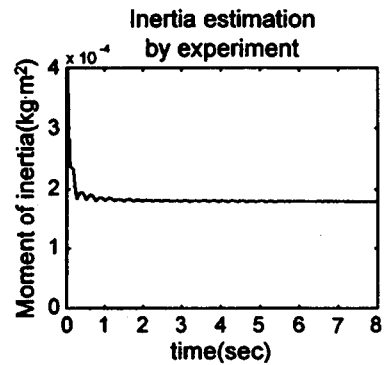
$$\hat{J}[k] = \hat{J}[k-1] - \frac{P[k-1]\Delta\alpha[k]}{\lambda + P[k-1](\Delta\alpha[k])^2} \cdot (\hat{J}[k-1]\Delta\alpha[k] - K_i \cdot \Delta I[k]) \quad (17)$$

관성모멘트 추정 알고리즘에서 식 (14)는 차분식을 씀으로써 샘플링주기에 비해 느리게 변하는 외란의 영향을 줄일 수 있고, 순환최소자승에 의한 추정법을 사용하여 잔류가능한 랜덤 노이즈의 영향을 최소화할 수 있다는 장점이 있다. 그러나, 추정식 계산을 위해 모터 가속도의 차분까지 이용하므로 측정오차로 인한 잡음에 민감하다는

단점이 있음을 쉽게 알 수 있다. 순환최소자승법을 삼성 SNC-32 CNC 제어기에 적용하여 이송축 시스템의 등가 관성모멘트를 구함과 동시에 시뮬레이션을 수행하였다.



(a) simulation



(b) experiment

Fig. 3 Experiment and simulation results of the inertia estimation

그림3-(a)는 시뮬레이션 결과로서 관성 모멘트가 $1.8 \times 10^{-4} [kg \cdot m^2]$ 인 경우 관성 모멘트의 추정을 나타낸 것이고 그림3-(b)는 삼성 직교 로봇에서 Y축 모터의 구동에 의해 움직이는 Z축 링크,스핀들 모터, 스핀들 모터를 고정하기 위한 모터 베이스가 부착된 상태에서 Y축 등가 관성 모멘트를 추정된 실험 결과이며 $1.842 \times 10^{-4} [kg \cdot m^2]$ 에 수렴한다. 이때 모터의 속도 명령은 로봇에 충격을 주지 않기 위해 싸인파를 사용하였고, 망각지수 λ 는 1로 하였다. 또한 정확한 관성 모멘트의 추정여부를 판단하기 위해 3축 직교 로봇의 Z축 링크를 분해하여 각각의 무게를 측정후 각각의 관성 모멘트를 계산하였고, 또한 각각에 대하여 순환 최소 자승법에 의해 관성모멘트를 추정

Table 1. Estimation and computation results of the inertia at the Y-axis

Moment of Inertia	Equivalent moment of inertia of
J_f	Feed motor + ball screw + their following part
J_z	Z-axis link
J_s	Spindle motor + motor base
J_t	Summation of three parts($J_f+J_z+J_s$)

Moment of Inertia	Estimation Method		Difference between two methods	Unit
	Manual	Recursive Least Square		
J_f	3.3926×10^{-5}	4.5812×10^{-5}	-1.1886×10^{-5}	Kg m ²
J_z	1.0193×10^{-4}	0.8568×10^{-4}	1.1620×10^{-5}	
J_s	6.0793×10^{-5}	4.9039×10^{-5}	1.1754×10^{-5}	
J_t	1.9665×10^{-4}	1.8053×10^{-4}	1.6119×10^{-5}	

하였다. 표1에 관성 모멘트의 계산 결과와 추정결과를 나타내었다.

표1에서 알수 있듯이 이송축 시스템의 등가 관성 모멘트(J_t)를 두 방식으로 계산 했을 때 발생한 오차는 순환 최소 자승법에서 추정된 J_t 를 기준으로 하였을 때 8.9%의 오차를 가진다. 이오차의 원인은 로봇에 부착되어 있는 볼스크류의 질량을 정확히 측정 하기 힘든 것과 관성 모멘트의 계산시 대상이 되는 물체의 질량 분포가 균일하지 않기 때문인 것으로 생각된다. 표1과 그림 3-(a)에서 알수 있듯이 순환최소 자승법에 의해 각각의 부품을 분해하여 관성 모멘트를 추정후 합한 값과 전체가 부착된 상태에서 추정 한 값의 차이($1.842 \times 10^{-4} - 1.8053 \times 10^{-4} = 3.67 \times 10^{-6}$)는 2%인 작은 값이기 때문에 순환 최소 자승법이 정확하다는 것을 의미한다. 따라서 외란 관측기에 사용한 Y축의 관성 모멘트는 실험적으로 추정 한 값(1.842×10^{-4})을 사용하였고, 관성모멘트에 의한 모델오차는 없다고 가정 하였다.

3. 실험 장치의 구성

기존의 시스템에 부가적인 장치 및 다른 구조적인 변경을 하지 않으면서 절삭력 측정을 위해 별도의 센서를 필요로 하지 않는 외란 관측기를 이용한 절삭력 제어시스템을 실제 절삭 공정에 적용하기위해 실험 장치를 구성하였다. 실험 장치의 구성도와 사진이 각각 그림 4와 그림 5에 나

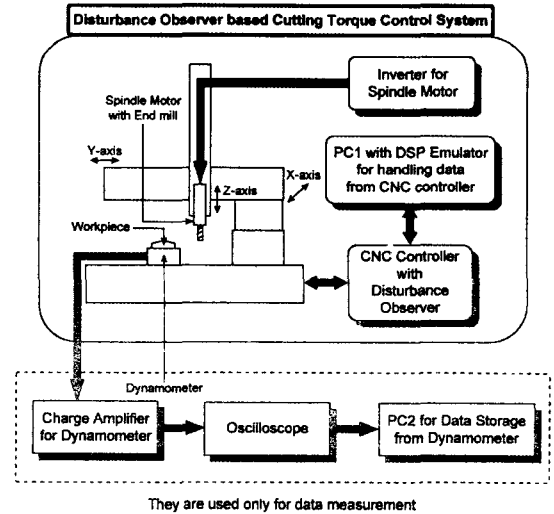
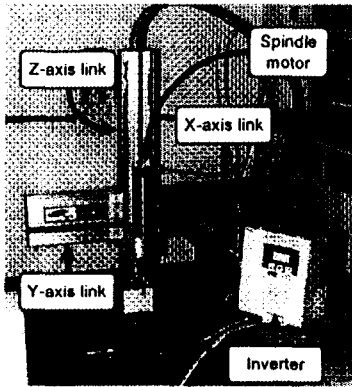


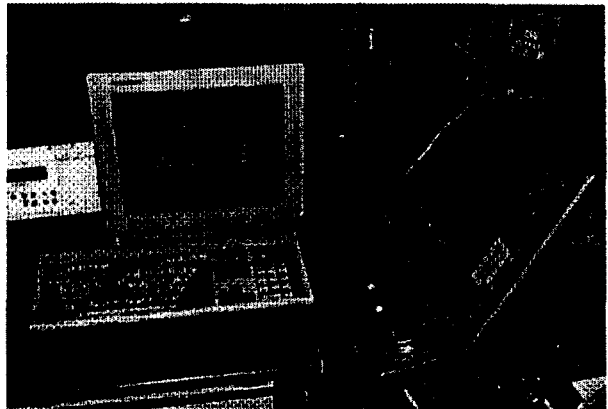
Fig. 4 Schematic diagram of the experimental set-up

타나 있다. 실험에 쓰인 이송축 시스템은 삼성전자의 3축 직교 로봇인 FARA RCM4A를 사용하였으며, CNC제어기는 삼성전자의 SNC-32 CNC 제어기를 사용하였다.

외란관측기에 의한 절삭력 추정의 검증을 위해 공구동력계를 사용하여 실제 절삭력을 측정하였으며, 사용한 공구 동력계는 Kistler사의 Type 9257B 이며, 스피들 모터는 TAC 기연공업의 TMEQ-60-30을 사용하였으며 인버터에 의해 회전속도의 조절이 가능 하다. 직교로봇의 이송축에 사용된 모터는 AC 서보 모터로서 절삭에 사용



(a) cartesian robot, spindle motor and inverter



(b) SNC-32 CNC

Fig. 5 Photograph of the experimental set-up

된 Y축은 Tamagawa사의 CSM-01BB1A이다. SNC-32 CNC 제어기는 32비트 CPU와 DSP를 사용한 멀티프로세싱 시스템으로서 운동제어부(Motion Control)를 담당하는 DSP에 의해 AC 서보 모터를 완전 디지털 제어를 수행하며, 위치, 속도 루프의 제어 주기는 1 msec이고 전류 루프의 200µsec이다. 외란 관측기는 위치, 속도 루프와 같은 제어 주기인 1msec의 제어 주기로 구현 하였다.

4. 외란 관측기에 의한 절삭력 추정

외란관측기에서 간접추정된 절삭 토크가 공구동력계에서 측정된 절삭력과 등가를 이룬다는 것을 보이기 위해서는 두 신호 사이의 해석과정이 필요하다. 공구동력계에서 측정한 힘을 각각 F_x , F_y , F_z 이라 하면 절삭력 F_c 는 아래와 같이 표시 된다.

$$F_c = \sqrt{(F_x^2 + F_y^2 + F_z^2)} \quad (18)$$

그러나 일반적으로 밀링 공정에서는 절삭공정시 큰 부하로 작용하는 힘의 성분이 스핀들 회전축의 방향이 아닌 이송축 시스템이 움직임으로써 생겨나는 스핀들 회전축과 직각을 이루는 방향의 F_x , F_y 이기 때문에 $F_z \ll \sqrt{(F_x^2 + F_y^2)}$ 이고, F_z 는 절삭 깊이의 변화에 상관 없이 거의 일정한 값을 갖기 때문에 F_x , F_y 만을 이용하는

것이 보통이다. 따라서, 외란관측기에서 나오는 신호는 F_x 와 F_y 의 두 힘에만 관련이 있다고 할 수 있다. 더구나, 공구 파손 등은 F_z 성분보다는 F_x 와 F_y 성분의 지배적인 영향을 받기 때문에 실제 절삭력 제어 시스템에서는 F_z 를 고려하지 않는다. 또한 직교로봇이나 일반적인 동작기계와 같이 볼스크류에 의해 모터의 회전 운동을 직선운동으로 변환할 때 힘의 관계는 아래와 같이 표시된다.

$$F_c = \frac{2\pi}{p} \eta T_c = K_f T_c \quad (19)$$

여기서

F_c : 절삭력(N)

T_c : 절삭 토크(Nm)

p : 볼스크류 피치(m)

η : 효율

이다. 여기서 η 는 볼스크류가 갖는 마찰저항등에 의해 결정된다. 실험에 사용된 볼스크류의 피치는 20(mm)이고, 효율 $\eta=1$ 로 한 경우 절삭력과 절삭 토크와의 변환 계수 $K_f=314.1593$ 이다. 실험을 통해 이 관계를 확인하기 위해 동일한 조건의 절삭공정 하에서 반복적인 실험을 통해 공구동력계의 신호와 외란관측기의 신호를 구한 뒤 공구동력계에서 나온 신호 $\sqrt{(F_x^2 + F_y^2)}$ 의 평균값과 외란 관측기에서 나온 신호의 평균값을 구하고, 이 두 값을 다시 식 (19)에 대입하여 K_f 를 구하면 317.945이다. 따라서 이론적인 값과 거의 동일한 값이며, 작기는 하

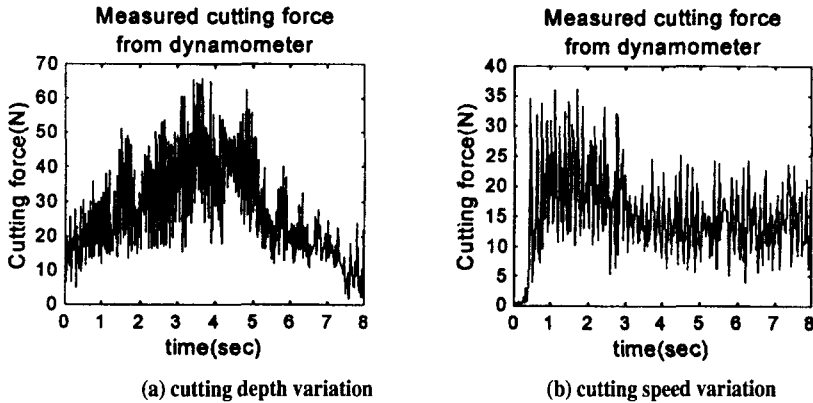


Fig. 6 Measured cutting force from dynamometer

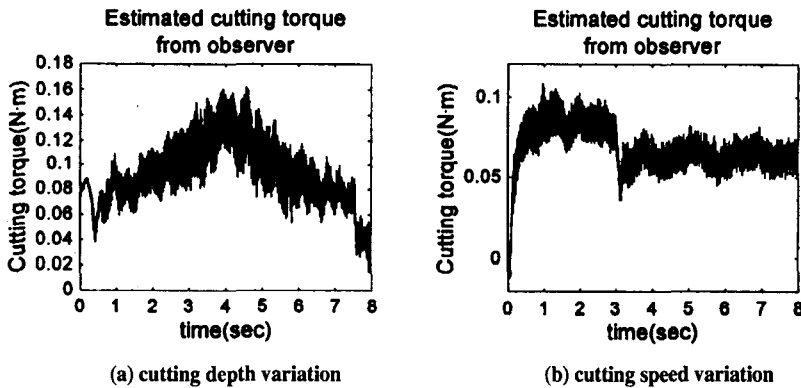


Fig. 7 Estimated cutting torque from disturbance observer

지만 오차의 원인은 볼스큐류의 마찰 저항을 무시하고 효율 η 를 1로 계산 하였기 때문이라 생각된다. 그림 6-(a)는 이송률이 200mm/min의 일정한 상태에서 절삭 깊이가 지분형으로 선형적인 변화를 취할 때, 그림 6-(b)는 절삭 깊이는 일정하지만 이송률이 중간에 100mm/min에서 50mm/min의 변화를 보일 때의 공구동력계의 출력 F_x, F_y 에서 계산된 $\sqrt{(F_x^2 + F_y^2)}$ 이며 그림 7은 그림 6에서 적용된 동일한 조건 하에서의 외란 관측기의 실제 출력이다. 두 그림을 비교하였을 때 외란 관측기의 출력이 공구동력계와 같은 경향으로 나타나고 있음을 알 수 있고, 위에서 지적한 절삭력과 절삭 토오크의 변환 계수 K_f 에 의해 관계되어짐을 알 수 있다. 따라서 이는 외란 관측기가 공구동력계와 같은 센서의 대응으로 사용 가능하다는 것을 보여주는 것이다. 실험에 사용된 재료는 아크릴이다.

5. 절삭력 제어 시뮬레이션 및 제어

5.1 절삭력과 절삭 깊이, 이송률간의 관계 해석

절삭력과 절삭 깊이, 이송률 간의 관계는 가공공정에서 야기되는 기하학적 조합때문에 복잡한 양상을 띄게 된다. 절삭날이 가지고 있는 오프셋이나 기울어진 형상은 가공 중에 예기치 않은 불균형을 야기시키기도 하며, 절삭공정시의 기하학적 조건을 국소적으로 변화시키고 결국 절삭공정에 대한 해석을 어렵게 만들기도 한다. 따라서, 절삭력을 측정하는 경우라면 측정된 절삭력이 절삭날의 홈, 오프셋, 기울어진 형상을 따라 생겨난 비선형적 현상을 포함하게 된다. 더구나, 실제 상황에서는 공구가 가지고 있는 연성이나 가공공정에서의 동적 효과를 무시할 수 없게 된다. 그러나, 이러한 모든 상황을 고려한 절삭공정 모

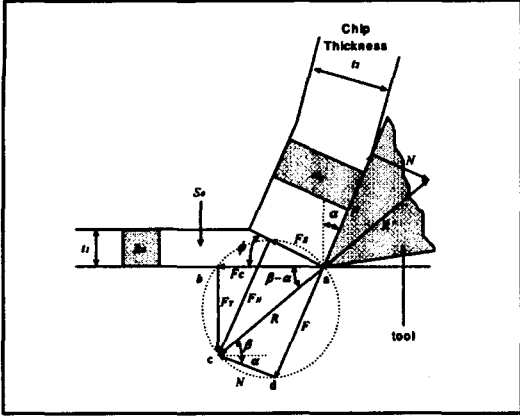


Fig. 8 Merchant's 2-dimensional cutting model

델은 그 복잡성과 비선형성으로 인해 제어기의 설계 또는 가공공정의 분석 등에 적합하지 않게 되고 대신에 단순 선형화된 절삭공정 모델을 필요로 하게 된다.⁽¹⁰⁾ 절삭시 가공물의 변형은 대부분이 3차원의 소성변형상태에서 진행된다. 그러므로 절삭공정을 이론적으로 다룬다면 3차원 응력과 변형을 다루어야 하지만, 3차원 이론은 매우 복잡하므로 일반적으로 이해하기 쉬운 2차원 절삭을 취급하고 여기에서 얻은 이론을 3차원에 적용하는 것이 편리하다. 그림 8은 Merchant에 의해 제시된 2차원 절삭 설명도 이다.⁽¹⁶⁾

그림 8에서 대상이 되는 절삭력 \$R\$은 재료의 항복전단응력 \$S_0\$, 전단각 \$\phi\$, 경사각 \$\alpha\$ 등 절삭시의 기하학적 조건 등이 일정하다는 가정과 동시에 그림 6에서 절삭 깊이인 \$t_1\$을 이송률(\$f\$)과 일정한 시간간격 \$\Delta t\$의 곱으로, 절삭 너비로 표시된 \$b\$를 절삭 깊이로 간주하여 식 (20)과 같이 표시된다.

$$R = \frac{S_0 A_0}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha)} = \frac{S_0 \cdot t_1 \cdot b}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha)}$$

$$= \frac{S_0 \cdot (f \cdot \Delta t) \cdot b}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha)} \quad (20)$$

(\$\because A_0 = t_1 \times b\$)

측정되는 절삭력이 토크로 표현되는 경우에는 절삭력과 이에 의한 토크 사이의 비례상수 \$K_f\$를 이용하여 식 (20)을 (21)과 같이 쓸 수 있고, 위에서 내린 가정을 근거로 하게 되면 가공중에 절삭 깊이가 변할때 이송률을 조정하여 절삭력을 조절할 수 있게 된다.

$$R = \frac{K_f \cdot S_0 \cdot (f \cdot \Delta t) \cdot b}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha)} = K_f \times R \quad (21)$$

5.2 절삭력 제어 시뮬레이션

그림 9는 이송축 시스템에 외란관측기를 적용한 절삭력 제어 시스템 블록 다이어그램이다. 이 블록 다이어그램에 의한 절삭력 제어 시뮬레이션을 절삭 깊이가 변화하는 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행 하였다. \$G(f)\$는 절삭 프로세스의 모델링으로서 식(21)에서 절삭 깊이가 그림 10과 같이 변할 때 이송률(\$F\$)에 따른 절삭 토크 \$Td\$가 생성되고, 이 \$Td\$가 이송축 시스템에 외란으로 작용하여 외란 관측기에서 추정된다 (\$\hat{Td}\$). 이 추정된 외란 토크가 절삭 토크로 되먹임되어 기준절삭 토크(\$T_{ref}\$)와 비교하여 이송축의 이송률을 변화 시키는데 사용된다. 여기서

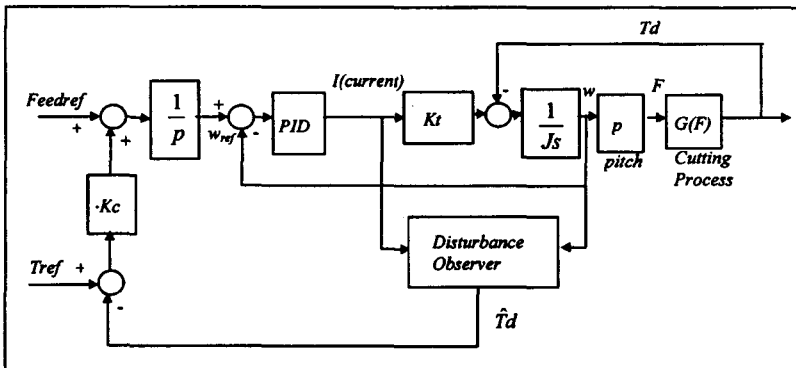


Fig. 9 Cutting force control system using disturbance observer

$Feed_{ref}$ 는 작업자에 의해 프로그램된 기준이송률이고 K_c 는 절삭 토크의 차에 따라 프로그램된 이송률에 증감되

는 양을 결정하는 계인이다.

그림 11은 절삭깊이가 그림10과 같이 변화 할 때 절삭에 걸리는 토크와 이송률의 변화를 나타낸것으로 절삭 토크크가 일정하도록 이송률이 제어되고 있음을 알수 있다.

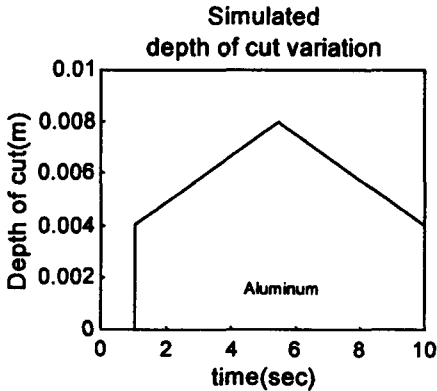


Fig. 10 Simulated cutting depth variation

5.3 절삭력 제어 실험

제안된 절삭력 제어 시스템의 성능 확인을 위해 삼성 직교 로봇 및 삼성 CNC를 사용하여 Y축 방향 이송에 대해 절삭력 제어 실험 및 기존의 일률적 이송률 하에서의 공정을 수행하였다. 삼성 CNC에서는 그림12와 같이 각 축의 위치 명령을 생성하기 위해 2단계 보간 시스템을 사용하고 있다.⁽¹³⁾ 즉 메인 CPU(i80486)에서는 8msec 마다의 보간의 종류 및 이송률을 받아 러프(Rough) 보간을 행한 후 가감속을 수행한다. 이 가감속된 데이터를 8msec마다 운동제어 DSP(TMS320C31)에 넘기며

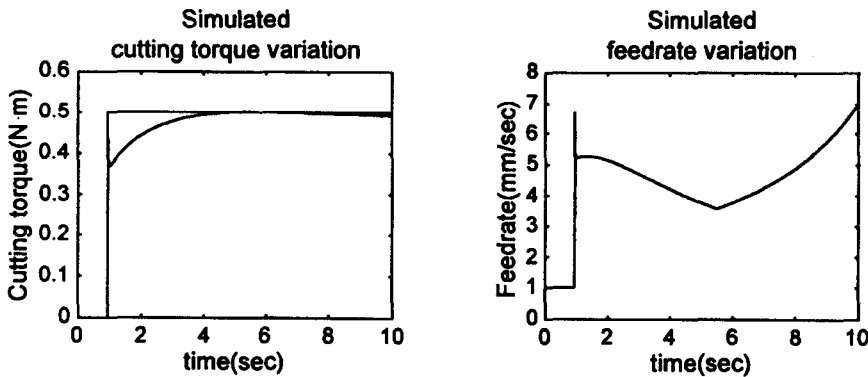


Fig. 11 Simulated cutting torque and feedrate

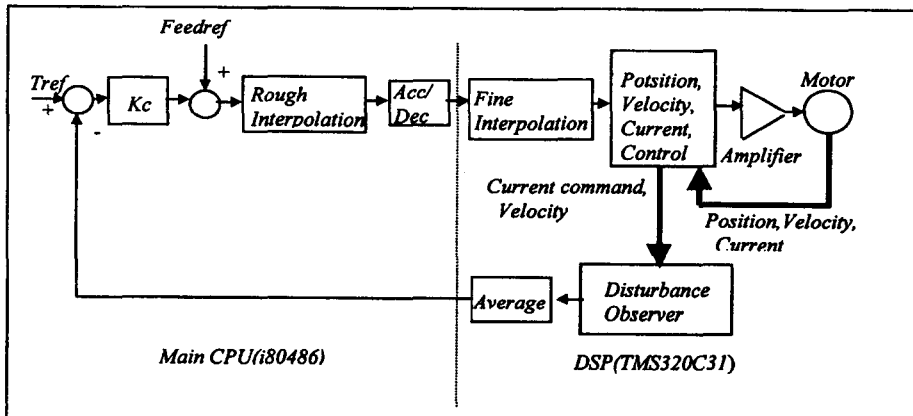


Fig. 12 Feed axis control system and cutting force control system of the SNC-32 CNC

DSP에서는 다시 1msec 보간을 수행하여 각축의 위치 명령을 생성한다.

DSP에서는 이송축에 사용된 AC 서보 모터를 디지털 제어를 수행 하며 위치 및 속도루프는 1msec, 전류 루프는 $200\mu\text{sec}$ 로 제어한다. 외란 관측기는 1msec마다 실행하여 8msec마다 평균한 값을 절삭 토크로 사용하였고 이송률의 제어는 8msec마다 수행 하였다. 절삭력 제어를 위해 기준 절삭 토크(T_{ref})와 외란 관측기의 출력을 8msec마다 평균한 값을 되먹임 하여 절삭 토크 오차를 구한 후 비례 게인 K_c 를 곱하여 프로그램된 이송률($Feed_{sp}$)에 더하여 절삭 토크에 따른 이송률 제어를 수행 하였다.

공구는 $\phi 10$ 의 절삭인선이 두개인 엔드밀로, 주축회전수는 900rpm, 기준절삭력은 $0.1\text{N}\cdot\text{m}$ 으로 설정했으며 가공소재는 로봇의 강성을 고려하여 아크릴을 사용하였다. 재료를 아크릴로 썼음에도 불구하고 실험 결과에서

절삭력과 이송률의 진동이 발견되는데 이는 사용된 직교 로봇의 강성에 의한 실험장치의 한계에서 기인한다고 생각된다. 그림 13은 실험에 사용된 계단형 시편을 나타낸

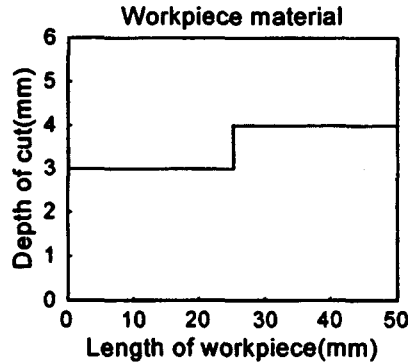
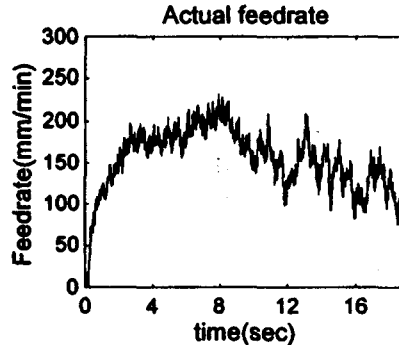
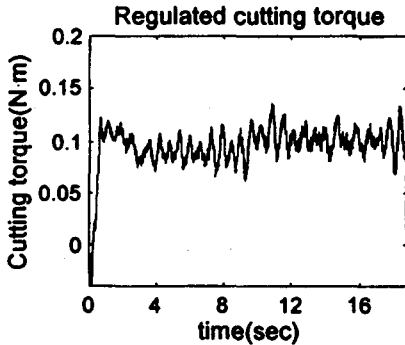
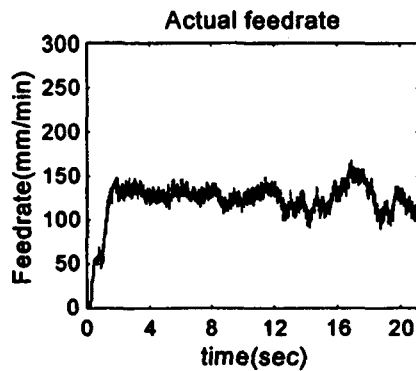
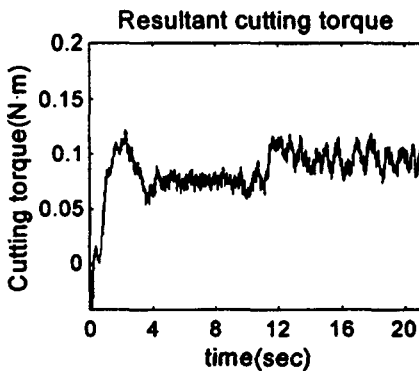


Fig. 13 Cutting depth variation : Case I



(a) regulated cutting torque and actual feedrate



(b) cutting torque and feedrate under constant feedrate

Fig. 14 Results of cutting experiment : Case I

그림이고 그림 14는 고정된 이송률 및 외란 관측기에 의한 절삭력 제어를 수행한후의 실험 결과이다. 그림 15는 실험에 사용된 지붕형 시편을 나타낸 그림이고 그림 16은 지붕형 시편에 대한 실험 결과를 나타낸다. 로봇의 강

성이 약하기 때문에 절삭력 제어시 진동이 나타 나지만 계단형 시편과 지붕형 시편에 대해 외란 관측기를 이용한 절삭력 제어 결과 가공 깊이에 관계없이 일정한 절삭 토 오르크로 절삭 가능함을 알수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 별도의 외부적인 센서없이 외란 관측기를 이용하여 절삭력을 간접 측정하여 절삭력 제어를 수행 하였다. 기존 CNC 공작기계의 구조변경 또는 부가적 장치 없이 제어기 내부에 소프트웨어로 구현된 외란 관측기에 의해 절삭력을 간접 측정, 이를 이송률의 온라인 조정에 이용하여 공구동력계와 같은 고가의 센서를 사용하지 않고도 절삭력 제어 시스템을 구현할 수 있었다. 절삭력 제어를 통하여 가공 도중에 기준 절삭력에 실제 절삭력이 추종하도록 절삭력을 일정하게 유지시켜 공구에 걸리는

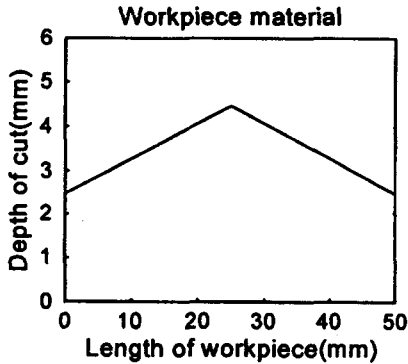


Fig. 15 Cutting depth variation : Case II

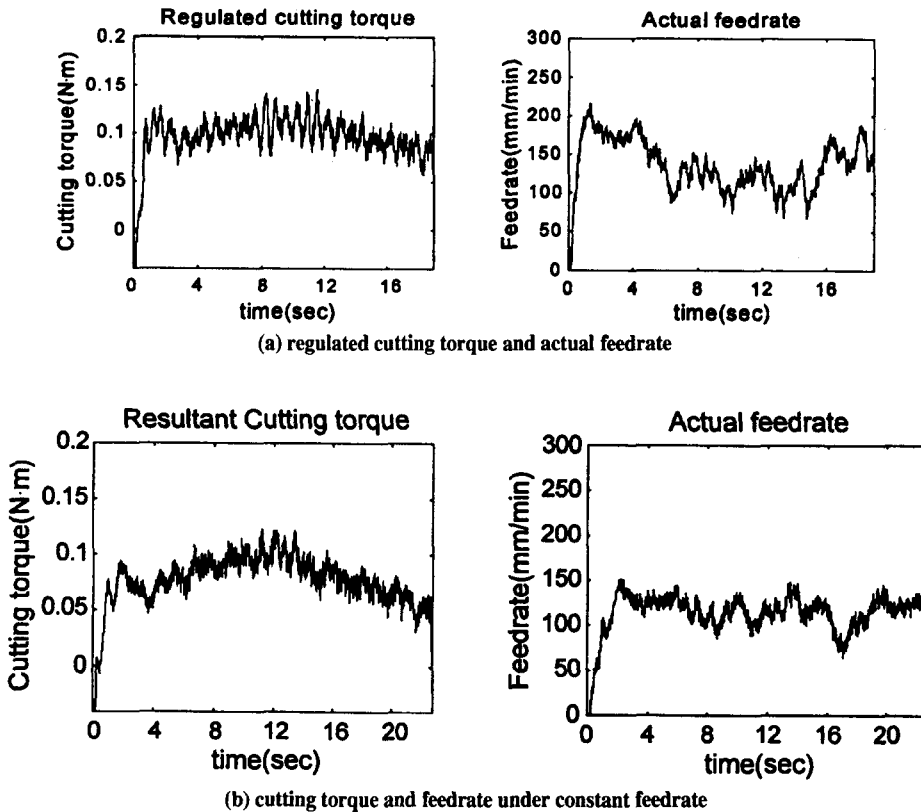


Fig. 16 Results of cutting experiment : Case II

급작스런 힘의 변화를 방지함으로써 공구 파손의 사전 방지에 대한 가능성을 보였다.

본논문의 실험에 사용된 직교로봇의 마찰력이 작기 때문에 무시하였으나 실제 공작기계에서는 무시 할 수 없을 정도로 크기 때문에 보다 나은 절삭력 추정을 위해 마찰력에 대한 고려와 다차원 절삭에 외란 관측기를 이용한 절삭력 제어의 연구가 필요하다고 생각된다.

참 고 문 헌

1. L.K. Lauderbaugh, A.G. Ulsoy, "Model Reference Adaptive Force Control in Milling," *Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry*, Vol. 111, pp. 13-21, 1989.
2. M. A. Elbestawi, R.Sagherian, "Parameter Adaptive Control in Peripheral Milling," *Int. J. Mach. Tools Manufact.* Vol. 27, No. 3, pp. 399-414, 1987.
3. L. Liu, Y. Mohamed, M.A. Elbestawi, "Application of Some Parameter Adaptive Control Algorithms in Machining," *Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and control*, Vol.112, pp. 611-617, 1990.
4. Y. Altintas, "Prediction of Cutting Forces and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurements," *Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry*, Vol. 114, pp. 386-392, 1992.
5. J. M. Lee, Lee, D. K. Choi, J. Kim, and C.N. Chu, "Real-Time Tool Breakage Monitoring for NC Milling Process," *Annals of the CIRP*, Vol. 44, pp. 59-62, Jan. 1995.
6. Tae-Young Kim, JongWon Kim, "Adaptive Cutting Force Control for a Machining Center by Using Indirect Cutting Force Measurements," *Int. J. Mach. Tools Manufact.* Vol. 36, No. 8 pp. 925-937, 1996.
7. Kim Jong-Won, "Adaptive Cutting Force Controller for Milling Processes by Using AC Servodrive Current Measurements," *Proc. of the 11th KACC*, pp. 840-843, Oct.1996.
8. Yoichi Hori, "Robust and Adaptive Control of a Servomotor using Low Precision Shaft Encoder," *IEEE IECON'93*, Nov. 15-19, 1993.
9. Rolf Johansson, "System Modeling & Identification," Prentice-Hall International.
10. B.K.Fussell, K.Srinivasan, "On-Line Identification of End Milling Process Parameters," *Trans. of the ASME, Journal of Engineering for Industry*, Vol. 111, pp. 322-330, Nov. 1989.
11. K.Ohnishi, M.Shibata, T. Murakami, "Motion Control for Advanced Mechatronics," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol. 1, No. 1, March 1996.
12. K. Ohnishi, N. Matsui, Y. Hori, "Estimation, Identification, and Sensorless Control in Motion Control System," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 82, No. 8, August 1994.
13. 송진일, 김동일, 김성권의 7인, "삼성 CNC의 개발 및 적용," 제3회 CNC 컨트롤러 워크샵, 제어계측신기술 연구센터, 서울대학교, 1994.
14. SAMSUNG SNC Series 32 조작 및 사용 설명서, 1994.
15. 손주형, 권동수, "외란 관측기를 이용한 CNC 공작기계의 절삭력 제어," *Proceedings of the 12th KACC*, October, 1997.
16. 양민양, "절삭가공(이론과 실제)," 청문각, 1997.