

밀링 공정에서 퍼지제어와 전류신호를 이용한 자동이송 연구

김도현(서강대 대학원) , 전도영(서강대 기계공학과)

Research on the auto feedrate control of milling processes by the fuzzy control of motor currents

Do-hyun Kim(Graduate school, Sogang Univ.), Doyoung Jeon(Mech. Eng. Dept., Sogang Univ.)

ABSTRACT

A research on the AFC(Auto Feedrate Control) by a fuzzy controller using a tool dynamometer and motor currents was conducted. For simulations, cutting dynamics of end-milling process was modeled by geometric relationship between tool and work-piece. The fuzzy logic controller was employed to track the desired cutting force and showed good performance in simulations and several experiments. The spindle motor currents was modeled to estimate cutting force and successfully used for the AFC.

Key Words : CNC (컴퓨터 수치 제어), AFC (Auto feedrate control, 자동 이송속도 제어), Cutting force (절삭력), Fuzzy logic controller (퍼지로지 제어기), Spindle motor current (주축모터 전류)

1. 서론

CNC공작기계의 운용을 통합하여 자동화할 수 있는 FMS 또는 CIM시스템을 구축하는데 있어서 해결해야 할 것 중 하나는 절삭상태 혹은 좁은 의미로 공구와 공작물 사이에 작용하는 절삭력을 실시간 감시하고 제어하는 기술이다. 절삭작업 중 이상상태가 발생하게 되면 공작기계와 공구에 과부하가 가해지게 되어 정밀도가 저하되고 공구의 파손, 채터의 발생, 이송축 및 주축의 휨, 베어링의 파손 등을 초래할 수 있다[1]. 따라서, 실제 작업현장에서는 숙련된 작업자가 개입하여 경험에 의존하여 최적의 절삭상태를 유지해주고 있다. 이와 같은 이유로 CNC 공작기계의 효율적인 운용이 어려웠고 가공상태에 따라 적절한 절삭조건을 유지해주는 제어기가 요구되었으므로 많은 연구가 수행되었다[2][3][4][5].

본 논문에서는 퍼지로지 제어기를 이용하여 일정한 절삭력을 유지하도록 이송속도를 조절하는 연구를 수행하였다. 2장에서는 공구와 공작물의 형상에 기반한 절삭모델을 유도하였다. 3장에서는 퍼지로직을 이용한 이송속도 제어기를 설계하였고, 4장에서는 실험과 절삭력 모델을 이용한 모사실험을 통해 제어기의 성능을 입증하였다. 5장에서는 주축 모터

전류로 절삭력을 간접 측정하여 절삭력을 제어해 보았고 6장에서는 본 연구에 대한 결론을 맺는다.

2. 절삭력 모델

밀링에서 절삭력은 공구날 형상에 의해 결정된다 [6][7]는 것을 기반으로 하여 절삭력 모델을 유도하였으며, 이때 모델의 파라미터들이 시불변이며 공작물과 공구는 강체로서 휨에 의해 발생하는 진동은 없다고 가정하였다.

Ruzhong과 Wang[6]이 제시한 절삭력 모델은 공구날에 수직으로 작용하는 절삭력 F_t 와 수평한 절삭력 F_r 을 다음과 같이 간략히 표현한다.

$$F_t = K_s f_t \sin \theta \quad (1)$$

$$F_r = K_r F_t \quad (2)$$

이때 θ 는 공구의 회전각, f_t 는 날 당 이송속도, K_s 는 비절삭력, K_r 은 비례상수이다. 식 (1), (2)는 절삭 깊이와 무관한 2차원 평면에서 유도된 식이고 실제 절삭력은 절삭깊이에 따라 변하게 된다. Fig. 1에서

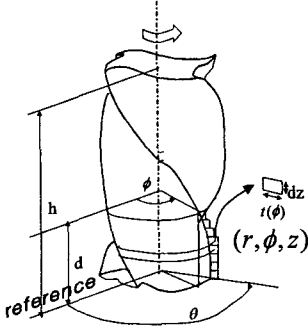


Fig. 1 The 3-dimensional geometry of a milling cutter and element cut by the cutter

공구 끝단($z = 0$)을 기준으로 했을 때, 날이 절삭하는 소재의 면적요소 $dz \cdot dt(\phi)$ 의 극좌표를 (r, ϕ, z) 라면, $\phi = \theta - 2\pi z/h$ 가 된다. 이때, θ 는 공구 끝단에서 날의 회전각, h 는 공구날의 길이, d 는 절삭깊이이다. 깊이요소 dz 를 고려한 절삭력 요소를 x, y 좌표계에서 표시하면 다음과 같으며 엔드밀의 특성상 z 방향의 힘은 무시한다.

$$dF_x = (K_s f_s \sin \theta \cos \theta + K_r K_s f_s \sin \theta \sin \theta) dz \quad (3)$$

$$dF_y = (K_s f_s \sin \theta \sin \theta - K_r K_s f_s \sin \theta \cos \theta) dz \quad (4)$$

2날 엔드밀의 경우 절삭깊이에 따라 두 날이 모두 절삭을 하는 경우와 한날만 절삭을 하는 경우가 있으므로 두 경우로 나누어서 절삭력 요소를 z 축에 대해 적분하면 절삭력의 방정식이 유도된다.

1날만 절삭하는 경우 :

$$F_x = -\frac{K_s f_t h}{8\pi} + \frac{K_s K_r f_t d}{2} + \frac{K_s f_t h}{4\pi} \sin \theta \sqrt{1 + K_r^2} \sin(\theta + \psi_1) \quad (5)$$

$$F_y = \frac{K_s f_t h}{8\pi} \sqrt{1 + K_r^2} \sin(2\theta - \frac{4\pi d}{h} + \psi_2) + \frac{K_s f_t h}{2} + \frac{K_s K_r f_t h}{8\pi} - \frac{K_s f_t h}{4\pi} \sin \theta \sqrt{1 + K_r^2} \sin(\theta + \psi_1) + \frac{K_s f_t h}{8\pi} \sqrt{1 + K_r^2} \sin(2\theta - \frac{4\pi d}{h} + \psi_2) \quad (6)$$

2날 모두 절삭하는 경우 :

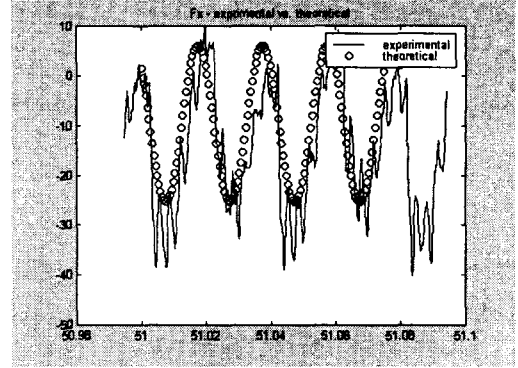


Fig. 2 Cutting force by model and experiment (Feed=60mpm, Spindle=1500rpm, $d=0.5$ mm)

$$F_x = \frac{K_s K_r f_t d}{2} + \frac{K_s f_t h}{4\pi} \sin \frac{2\pi d}{h} \sqrt{1 + K_r^2} \sin(2\theta - \frac{2\pi d}{h} + \psi_2) \quad (7)$$

$$F_y = \frac{K_s f_t d}{2} - \frac{K_s f_t h}{4\pi} \sin \frac{2\pi d}{h} \sqrt{1 + K_r^2} \sin(2\theta - \frac{2\pi d}{h} + \psi_2) \quad (8)$$

이때 $\tan \psi_1 = -K_r$, $\tan \psi_2 = 1/K_r$ 이다.

절삭력 방정식 (5) ~ (8)에서 상수 K_s 와 K_r 는 공구와 공작물의 특성에 의해 결정되게 된다. Li[7]에 의하면 K_s 와 K_r 는 평균절삭깊이 \bar{t}_c 의 지수함수 꼴로 나타낼 수 있다고 한다.

$$K_r = a_0 \bar{t}_c^{-a_1} \quad (9)$$

$$K_s = b_0 \bar{t}_c^{-b_1} \quad (10)$$

$$\bar{t}_c = \frac{d_r f_t}{r(\theta_2 - \theta_1)} \quad (11)$$

이때 d_r 는 반경방향 절삭깊이이며 θ_1 과 θ_2 는 각각 인입각과 출구각이다. 상수를 결정하기 위해 수행한 실험에서는 완전 절입이고 따라서 $\theta_2 - \theta_1 = \pi$, $d_r/r = 2$ 이므로, $\bar{t}_c = 2f_t/\pi$ 이다. a_0, a_1, b_0, b_1 은 공작물과 공구의 물성에 의해 결정되는 상수로 실험을 통해서 구한다. 절삭시편은 Al6061-T6이고, 다양한 실험조건(이송속도, 절삭깊이, 공구지름)하에서 행한 절삭실험으로부터 얻은 데이터를 비선형 회귀 분석하여 상수들은 구해보면 다음과 같다.

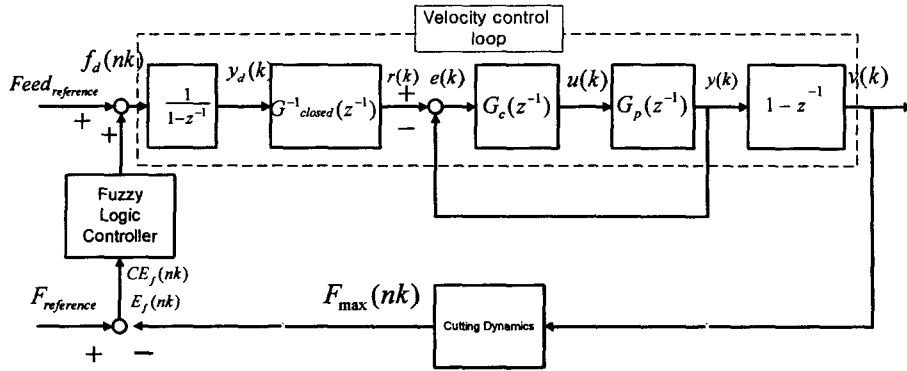
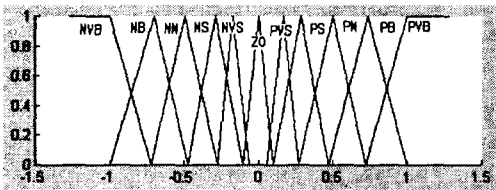
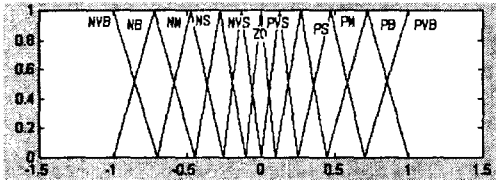


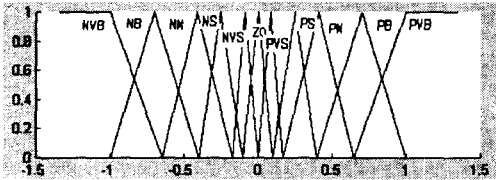
Fig. 3 The block diagram of the fuzzy AFC



(a) The membership function of E



(b) The membership function of CE



(c) The membership function of CO

Fig. 4 Membership functions for the AFC

$$K_r = 0.1635 \bar{t}_c^{-0.3526} \quad (12)$$

$$K_s = 800.1207 \bar{t}_c^{-0.1973} \quad (N/mm^2) \quad (13)$$

모델로부터 추정된 절삭력(F_x)과 공구동력계로 측정된 절삭력을 Fig. 2에 비교하였다. 주기는 정확히 일치하는 것을 볼 수 있고 절삭력의 크기도 어느 정도 일치하는 것을 볼 수 있으나 진동에 의한 고주파 성분은 모델에 포함되지 않았기 때문에 예측할 수 없었다. 이 모델이 다음에 나오는 모사실험에 사용된다.

Table 1 Rule base of fuzzy control

E/CE	NVB	NB	NM	NS	NVS	ZO	PVS	PS	PM	PB	PVB
NVB	NVB	NVB	NVB	NVB	NVB	NVB	NB	NM	NS	NS	ZO
NB	NVB	NVB	NVB	NB	NM	NM	NM	NS	ZO	PS	PS
NM	NVB	NVB	NB	NM	NM	NS	NS	NS	ZO	PS	PS
NS	NVB	NB	NM	NM	NS	NVS	NVS	ZO	PS	PS	PM
NVS	NVB	NB	NM	NS	NVS	NVS	ZO	PVS	PS	PM	PB
ZO	NB	NM	NS	NVS	NVS	ZO	PVS	PVS	PS	PM	PB
PVS	NB	NM	NS	NVS	ZO	PVS	PVS	PS	PM	PB	PVB
PS	NM	NS	NS	ZO	PVS	PVS	PS	PM	PM	PB	PVB
PM	NS	NS	ZO	PS	PS	PS	PM	PM	PB	PVB	PVB
PB	NS	ZO	PS	PS	PM	PM	PB	PB	PVB	PVB	PVB
PVB	ZO	PS	PS	PM	PB	PVB	PVB	PVB	PVB	PVB	PVB

3. 절삭력 제어 알고리즘

절삭력 방정식은 많은 가정을 통해 단순화되었음에도 시간에 따라 계속 변하는 삼각함수들의 합성으로 표현되는 비선형식이므로, PID나 극점배치제어와 같은 모델에 기반한 제어방법이 적용되기 힘들다. 따라서, 정확한 시스템 전달함수가 없어도 제어를 설계할 수 있고 비교적 우수한 성능을 내는 퍼지제어를 도입하였다.

임의의 목표 절삭력 F_d 를 정해놓고 안전을 고려하여 공구가 한번 회전하는 동안의 최대 절삭력, 즉 $\sqrt{F_x^2 + F_y^2}$ 의 최대값이 F_d 를 추종하도록 하였다. Fig. 3의 블록선도와 같이 고안된 제어기는 공구의 한 회전 당 획득한 절삭력의 최대값을 구하여 목표 절삭력과 비교한 뒤 퍼지 추론기에서 적절한 속도지령을 구한다. 그리고 공구가 다음 한번 회전할 동안 이 속도지령을 유지하도록 하였다.

설계된 퍼지제어를 자세히 살펴보면 한 회전 당 얻은 최대 절삭력과 목표절삭력의 차이 $E(nk)$ 와 한 회전 이전에서의 오차와 현재의 오차의 차이 $CE(nk)$ 를 정규화한 뒤 멤버쉽 함수로 언어변수화한다. 이 언어변수들로부터 룰베이스를 참조하여 언

1) 속도제어루프의 샘플링 시간 k 와 구별하기 위해 nk 로 표기한다. n 은 주축의 한 회전시간에 해당하는 샘플수다.

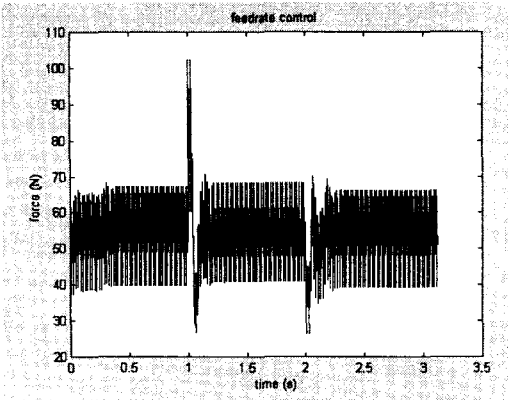


Fig. 5 Simulation of cutting force control

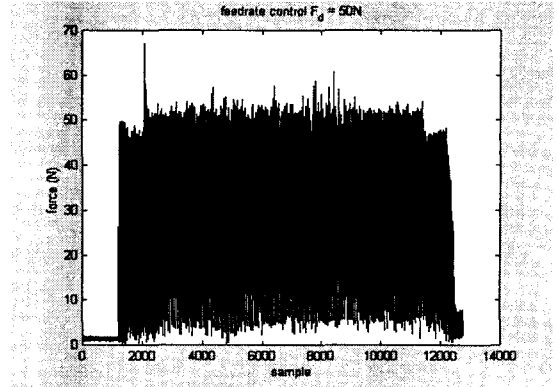
이변수로 된 속도지령 $CO(nk)$ 를 내린 뒤, 멤버쉽 함수를 통해 실수로 바꾸어 제어가능한 속도지령을 완성하게 된다. 이때 멤버쉽 함수들과 룰베이스는 Fig. 4와 Table 1과 같다. Braae와 Rutherford[8]가 제안한 규칙에 따라 모사실험을 수행하면서 시행착오를 통해 구하였다. 절삭력의 최대값이 일정한 이송속도에서도 계속적으로 조금씩 변하는 특성을 고려하여 $E(nk)$ 의 멤버쉽 함수가 데드밴드(dead-band)의 효과를 갖도록 정하였다.

4. 모사실험 및 실험결과

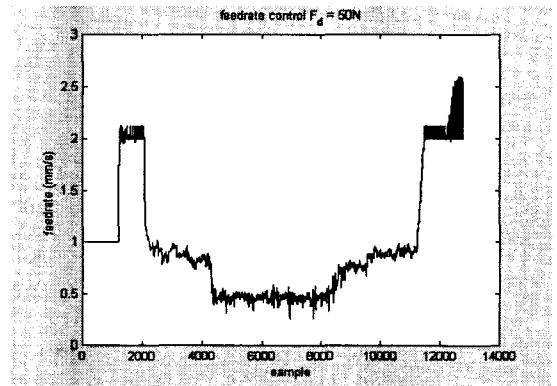
설계된 퍼지제어기를 바탕으로 절삭력 제어 모사 실험과 실험을 수행하였다. 즉 절삭깊이 d 가 바뀌어 절삭력이 변할 때 이송속도를 조절하여 목표 절삭력을 유지하도록 하였다. x 방향은 고정시키고 y 방향으로만 이송하면서 실험하였고 공작물은 Al6061-T6를 사용하였다.

모사실험에서는 절삭깊이가 3단계(1mm \rightarrow 1.5mm \rightarrow 1mm)로 변할 때 최대 절삭력이 70N을 유지하도록 하였다. 초기 이송속도를 60mpm으로 하고, 주축속도는 1500rpm, 공구지름이 10mm인 양날 밀링 커터를 절삭조건으로 하여, 식 (5) ~ (8)로부터 절삭력을 생성하였고 이를 실시간으로 제어하는 모사실험을 수행하였다. Fig. 5에서 보듯이 절삭깊이가 증가되는 시점에서 절삭력이 105N까지 크게 증가했다가 감소되며, 절삭깊이가 감소하는 시점에서는 45N까지 감소했다가 다시 70N을 유지함을 알 수 있다.

실험에는 대우중공업의 수직형 머시닝 센터 ACE-V30를 이용하였고, KISTLER사의 9157B공구동력계, 제어기로는 dSPACE사의 DS1003 DSP보드를 사용하여 이송속도 제어 및 데이터 획득과 처리를 담당하게 하였다. 절삭깊이가 5단계로 변하는 경우



(a) Cutting force profile



(b) Velocity command

Fig. 6 Cutting force control by the AFC with a dynamometer

(0.5mm \rightarrow 1mm \rightarrow 1.5mm \rightarrow 1mm \rightarrow 0.5mm) 에 50N의 절삭력을 유지하도록 하였다. Fig. 6(a)에 보듯이 최대 절삭력이 50N이 유지되고 이때 절삭깊이에 따라 속도가 변하는 것은 (b)에 보이는 것과 같다.

5. 주축모터 전류를 이용한 절삭력 제어

앞에서는 절삭력을 제어하기 위해 공구동력계를 사용하였다. 공구동력계는 매우 고가이고 절삭유를 사용하면 고장이 유발될 수 있으며 공구의 이송경로에 간섭이 될 수 있는 등 현재로서는 산업현장에 이용되기 힘든 것이 사실이다. 따라서, 공구동력계를 대체할 목적으로 간접적으로 절삭력을 측정하는 방법이 연구되었는데 주로 공작기계의 주축계를 이용하는 방법과 이송축계를 이용하는 방법으로 나뉜다 [9]. 주축계의 경우에는 주축에 스트레인 게이지를 부착하여 절삭토크를 측정하는 방법, 기하학적 모델로부터 금속제거율(MRR)을 구해서 이용하는 방법 전력센서를 이용하는 방법 등이 있다. 이송축계를

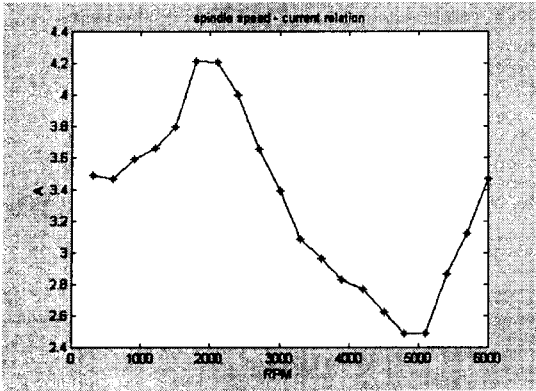


Fig. 7 Damping torque for various spindle speeds

이용하는 방법에는 이송축의 DC모터 전류, AC모터 전류를 이용하는 방법이 있다. 여기서는 공작기계에서 가장 손쉽게 얻을 수 있는 주축모터 전류를 이용해서 절삭력을 제어하는 방법에 대해 연구하였다. 주축 시스템의 운동방정식은 다음과 같다.

$$T_m = K_t I = J_e \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_f + T_c \quad (14)$$

모터가 주축에 가하는 토크 T_m 은 입력된 전류 I 와 토크상수 K_t 의 곱과 같고, 이 토크는 시스템의 등가 관성모멘트 (J_e)를 가속하는데 쓰이고, 윤활유 등에 의한 댐핑효과(B)와 주축 시스템의 점성·쿨롱 마찰 (T_f)과 주축에 반영된 절삭토크 (T_c)를 보상하는데 이용된다. 이때 시스템에 작용하는 외란 토크는

$$T_d = \text{sgn}(\omega)T_f + K_f \cdot F_c \quad (15)$$

이다. 여기서 F_c 는 절삭력, K_f 는 모멘트의 팔에 해당하는 절삭토크전달상수(cutting force transmission constant)이고, T_f 는 쿨롱 마찰토크이다. 위 관계식으로부터 전류 I 를 알고 계수들을 알면 역으로 F_c 를 구할 수 있다. 이때 전류 I 는 모터에 공급되는 삼상 전류를 RMS변환을 통해 구한다.

주축전류는 일반적으로 주파수 대역폭이 이송축 전류보다 떨어지지만(5Hz이하)[10], 공구 한 회전당 최대 절삭력 혹은 절삭력의 평균값과 같은 준정적인(quasi-static)양으로 제어할 때에는 센서로서의 역할을 충분히 할 수 있다고 한다[11].

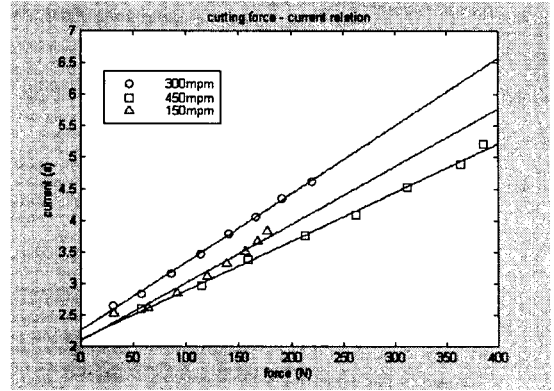


Fig. 8 Relation between currents and cutting force at various feedrates

전류와 절삭력과의 관계를 파악하기에 앞서 주축 시스템의 댐핑과 마찰특성을 파악할 필요가 있다. 절삭을 하지 않으며 가감속이 없는 정상상태일때 모터토크를 측정하면 식 (15)에서 $d\omega/dt=0$ 이므로

$$K_t I = T_m = B \cdot \omega + T_f \cdot \text{sgn}(\omega) \quad (16)$$

가 된다. ACE-V30 머시닝 센터의 주축 모터 인입 전류선에 홀 전류센서를 설치한 뒤, 다양한 주축 속도로 회전하면서 정상상태에서 전류의 RMS값을 구하였다. 그 결과 Fig. 7과 같이 마찰과 댐핑에 의한 효과가 주축속도에 따라 비선형적으로 나타났지만 절삭작업 중 주축속도를 바꾸는 경우는 드물기 때문에 절삭력 제어 시에는 한 주축속도에 해당하는 마찰과 댐핑토크만 고려해주면 된다.

전류와 절삭력과의 관계를 얻기 위해 절삭깊이와 이송속도를 다양하게 바꿔가면서 전류와 절삭력을 측정된 결과가 Fig. 8과 같다. 동일한 이송속도에서는 전류와 절삭력과의 관계를 선형식으로 나타낼 수 있었으나, 이송속도가 바뀌면 이 관계가 달라짐을 알 수 있다.

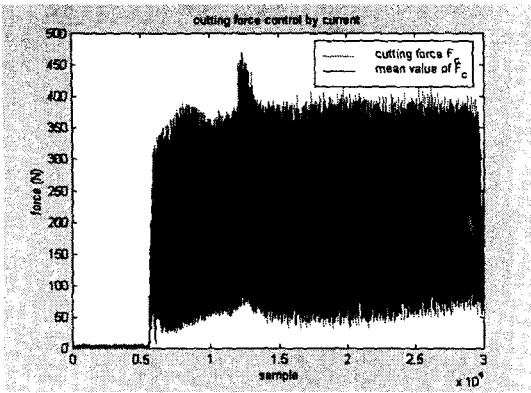
$$I = 9.179 \times 10^{-3} \times F_c + 2.0948 \quad (150\text{mpm}) \quad (17)$$

$$I = 1.077 \times 10^{-2} \times F_c + 2.2606 \quad (300\text{mpm}) \quad (18)$$

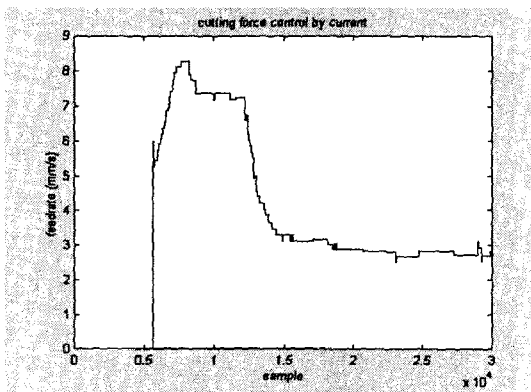
$$I = 7.741 \times 10^{-3} \times F_c + 2.1160 \quad (450\text{mpm}) \quad (19)$$

따라서 제어를 하기 위해서는 이송속도에 따라 실시간으로 절삭력을 보정해야 할 것이다.

앞에서 얻은 전류와 절삭력과의 관계를 바탕으로 퍼지로지 제어를 이용해 절삭력을 제어해 보



(a) Cutting force profile



(b) Velocity command

Fig. 9 Cutting force control by the AFC with spindle motor current

았다. 4장에서와 동일한 장치를 가지고 실험을 하였다. 주축속도가 4500RPM이고 절삭깊이가 1.5mm에서 3mm로 급격히 변할 때 주축전류를 측정해서 공구 한 회전 당 절삭력의 평균값이 일정 절삭력 200N을 추종하도록 하였다. 전류는 노이즈가 많은 신호로서, 필터를 이용하여 노이즈의 영향을 최소화하였다. Fig. 9(a)에서 보듯이 평균 절삭력이 200N을 유지하며 이송속도를 (b)와 같이 조절해서 절삭력이 잘 제어되었음을 알 수 있다.

6. 결론

실시간 절삭상태 감시 및 제어기술 연구의 일환으로 퍼지제어기와 주축모터전류를 이용하여 일정 절삭력을 제어하는 연구를 수행하였다. 공구와 공작물의 형상으로부터 2날 엔드밀의 절삭력 모델을 구하였고, 실제 측정한 절삭력과 비교하여 모델의 적합성을 검증하였다. 절삭력의 비선형적인 특성을 고려하여 퍼지제어기를 도입하고 앞에서 구한 모델을

이용하여 모사실험을 수행하였다. 공구동력계를 이용한 실험에서 절삭력이 절삭깊이의 변화에도 잘 유지됨을 보였다. 주축 시스템의 운동방정식으로부터 전류와 절삭력의 관계를 파악했고 전류를 이용한 AFC실험에서도 절삭력이 잘 제어될 수 있음을 보였다.

참고문헌

1. 오영탁, 권원태, 주종남, "밀링공정 중 절삭조건 변화에 따른 절삭력 추종제어를 위한 DSP보드의 응용", 한국정밀공학회 제 16권 제 3호, pp.38-39, 1999.
2. A. Spence and Y. Altintas, "CAD Assisted Adaptive Control for Milling", *ASME J. of Dynamic Systems Measurement and Control*, Vol. 113, pp.444-450, 1991.
3. S. J. Rober, Y. C. Shin and O. D. I. Nwokah, "A Digital Robust Controller for Cutting Force Control in the End Milling Process", *ASME J. of Dynamic Systems Measurement and Control*, Vol. 119, pp.13-21, 1997.
4. L. K. Lauderbaugh and A. G. Ulsoy, "Model Reference Adaptive Force Control in Milling", *ASME J. of Eng. for Industry*, Vol. 111, pp73, 1989.
5. M. A. Mannan and S. Broms, "Monitoring and Adaptive Control of Cutting Process by Means of Motor Power and Current Measurements", *Ann. CIRP*, Vol. 38, No. 1, pp.347-350, 1989.
6. Z. Ruzhong and K. Wang, "Modeling of cutting force pulsation in face milling", *Ann. CIRP*, Vol. 32, No. 1, pp.21-26, 1983.
7. Z. Li, S. C. Yun and S. Y. Liang, "Three dimensional cutting force analysis in end milling", *Int. J. Mech. Sci.* Vol. 38, No. 3, pp.265-266, 1996.
8. M. Braee and D. A. Rutherford, "Selection of parameters for a fuzzy logic controller", *Fuzzy Sets Syst.*, Vol. 2, No. 2, pp.185-199, 1979.
9. P. W. Prickett and C. Johns, "An overview of approaches to end milling tool monitoring", *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 39, pp.105-122, 1999
10. P. Bertok, S. Takatam J. Matushima, J. Ootsuka, T. Sata, "A system for monitoring the machining operation by referring to a predicted cutting torque pattern", *CIRP*, Vol. 32, No. 1, pp.439-443, 1983.
11. 김기대, 권원태, 주종남, "주축모터 전류를 통한 절삭력의 간접측정 및 절삭력 추종제어", 한국정밀공학회지 제 14권 제 10호 pp.15-27, 1997.