

## 주축 모터 출력 특성에 근거한 무인 선삭 가공 기술 An Unmanned Turning Process Technique Based on Spindle Motor Power Characteristics

박 장 호(한양대학교 대학원), 허 건 수(한양대학교 기계공학부)  
Changho Pak (Graduate School, Hanyang Univ.), Kunsoo Huh (Hanyang Univ.)

### Abstract

In the turning process, the feed is usually selected by a machining operator considering workpiece, cutting tool and depth of cut. Even if this selection can avoid power saturation or tool breakage, it is usually conservative compared to the capacity of the machine tools and can reduce the productivity significantly. This paper proposes a selection method of the feed and the reference cutting force based on MRR(material removal rate), maximum spindle power and specific energy. In order to estimate and control cutting force accurately in transient and steady state, this study utilizes a synthesized cutting force estimation method and a Fuzzy controller. The experimental results present that these systems can be useful for the FMS(flexible manufacturing system) and unmanned automation system.

**Key Words** : reference cutting force(기준 절삭력), reference feed(기준 이송), spindle motor power(주축 모터 출력), fuzzy logic control(퍼지 논리 제어)

### 1. 서 론

생산공정에 있어서 선삭에 의한 가공기술은 지난 수십년간 수치제어(CNC) 공작기계의 발전과 함께 눈부신 발전을 하였다. 선삭 과정에서 절삭력 정보의 중요성은 그 동안 공작기계 분야에서 익히 강조되어 왔으며, 실시간의 주절삭력 정보는 공구 파손을 예측하고 마모를 감지하며 그 밖의 다른 오 동작을 검출

해 내는 데 있어 매우 중요한 것으로 잘 알려져 있다<sup>[1,2]</sup>. 절삭력의 세가지 성분 중에서 주절삭력은 대개의 경우 가장 큰 것으로서 일정한 절삭력을 유지하는 연구에 많이 활용되는 변수이다.

그러나 이러한 연구를 함에 있어 일정한 절삭력의 설정에 대한 근거를 설명하기엔 앞서 선행된 연구에서 당위성을 찾기엔 부족하다. 이에 본 연구에서는 CNC 선반의 주축 출력한도 내에서 가장 적절한 절삭력, 즉 최대 주축 출력( $P_{c\ max}$ )과 최대 금속 제거율( $MRR_{\ max}$ ), 그리고 최대 이송( $f_{\ max}$ )을 고려하여, 안전한 영역 내에서 절삭작업이 원활히 이루어질 수 있게 하는 것을 목표로 한다<sup>[13,14]</sup>.

전동기의 특성상 회전수가 증가함에 따라 주축의 출력이 증가하지만, 기준속도(base speed)를 전후로 하여 주축의 출력의 변화가 있으며 기준속도 이전에는 회전수의 증가에 따라 주축의 출력이 선형적으로 증가하나, 기준속도 이후에는 제한속도까지 일정한 출력을 유지한다.

따라서 본 연구에서는 대상 모델의 전동기 특성을 고려하여 최대 절삭소요동력과 최대 금속 제거율을 고려하여 가장 생산성이 용이한 기준 절삭력과 기준 이송을 결정하고자 한다. 이때 결정되어지는 기준 절삭력을 절삭력 제어의 기준값으로 사용하고 일정 절삭력 제어기를 설계하여 무인가공이 이루어지도록 한다.

### 2. 연구 배경

절삭력 추정에 대한 연구는 지난 수십년간 많은 발전이 있었다. 절삭 현상의 원리를 수학적으로 모델화

하여 절삭력을 추정해 내는 방식들을 들 수 있다 [3,4,7,8]. 그러나 이 방식들은 절삭조건에 근거하여 절삭력이 계산되므로 가공소재, 공구 등에 따라 모델변수들이 튜닝되어야 하는 번거로움이 있었다. 모델에 기초한 모니터링 시스템은 기계 진단 분야에서 널리 이용되어 왔으며, 이러한 방식의 원리는 기계적 오류를 모델 파라미터의 변화나 상태의 변화로서 감지하는 것이다. 예를 들면 교류 주축 드라이브(AC Spindle-Drive)의 모델을 이용하여 절삭 가공시 절삭력을 간접적으로 추정할 수 있는 방식을 개발하였으며<sup>9)</sup>, 이러한 간접 모니터링 방식은 공작기계의 구동부를 대상으로 하였으므로 가공 소재와 공구의 조합이나 절삭 조건에 상관없이 적용할 수 있다는 큰 장점을 지니고 있다. 또한 절삭 가공 중 공구와 공작물간의 가해진 힘, 마찰력, 절삭온도, 절삭시간에 따라 변하는 감쇠계수, 마찰 토크 등의 비선형 요소와 가공 중 발생하는 속도변화까지 고려하여 교류 유도 전동기 시스템에 대한 동적모델을 유도하고 이 모델을 토대로 절삭력 감지 방식을 개발하였다 [18,19,20].

본 연구는 CNC 공작기계의 주축 전동기의 특성을 고려하여, 전동기의 출력 곡선도와 토크 곡선도에 대해 회전수의 증감에 따른 소요동력과 무부하시 소요동력과의 차이를 모델링을 하여 전동기의 최대 출력에 근접한 영역에서 작업이 이루어 질 수 있도록 소요동력을 최대한 활용하고자 한다.

### 3. 대상 모델의 특성

본 연구에서 사용된 대상 모델은 통일 중공업 TSL-6UM이며, 대상 모델 주축모터의 출력-속도 특성은 그림 1과 같다. 기준속도를 전후하여 출력의 특성을 나타내고 있다.

이전 연구에서 절삭력 모니터링 시스템은 공작기계의 주축 구동 전동기를 제어하기 위해 이미 설치되어 있는 센서의 출력 값을 이용하는 것이므로 쉽게 측정이 가능한 전동기 각속도, 고정자 전압(전동기 입력 전압), 고정자 전류(전동기 입력 전류)가 나타내는 범위를 시스템 경계로 결정하여 측정 가능한 신호와 절삭력 신호와의 관계를 위해서 모니터링 모델을 선정하였고, 모니터링 모델은 기계적인 부분(주축 드라이브)과 전기적인 부분(교류 유도 전동기)으로 구성되며 모델링이 가능하였다<sup>9)</sup>.

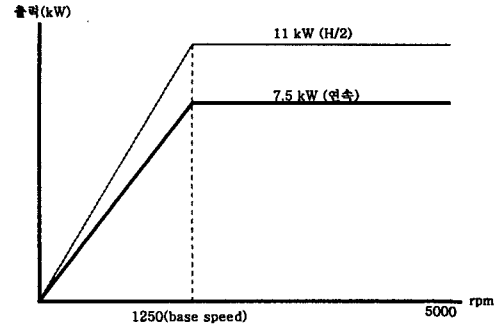


그림 1 대상모델 주축모터의 출력-회전수 특성

#### 3.1 모터 출력에 근거한 이송과의 관계

본 연구에서 제시하는 주축모터의 출력특성을 고려하여 최대 절삭동력( $P_{Cmax}$ )을 구하는 식(1)으로 표현할 수 있으며, 이때 주축 모터의 최대 출력( $P_{S0}$ )은 그림 1 에서와 같은 특성을 갖으며, 모터의 무부하 출력( $P_0$ )은 절삭이 이루어지기 전에 측정되어진다.

$$P_{Cmax} = P_{S0} - P_0 \quad (1)$$

그러나, 식(1)의 최대 절삭동력( $P_{Cmax}$ )은 최대 출력( $P_{S0}$ ) 상태에서 결정되는 값이므로, 실제 절삭 가공시에는 식(2)와 같이 절삭 소모 출력( $P_S$ )과 주축 모터의 무부하 출력( $P_0$ )과의 관계를 이용할 수 있다 이때 절삭동력( $P_{C0}$ )은 최대 절삭동력( $P_{Cmax}$ )보다 작아야( $P_{C0} < P_{Cmax}$ ) 안전한 연속 영역에서 절삭 가공이 이루어질 수 있다.

$$P_{C0} = P_S - P_0 \quad (2)$$

다음으로 절삭속도( $V_C$ )와 절삭깊이( $a_0$ ), 그리고 기준이송( $f_0$ )의해 결정되는 금속 제거율( $MRR$ )의 관계식(3)으로 표현할 수 있다<sup>15,16)</sup>.

$$MRR = a_0 \cdot V_C \cdot f_0 \quad (3)$$

위의 식을 토대로 주축모터의 출력 범위내에서의 절삭깊이와 이송과의 관계는 다음의 표 1과 같다. 따라서 최대 절삭 출력에 근거한 최대이송과의 관계를 위의 표와 같이 설정이 가능하며, 최소 절삭 깊이를 기준으로 허용된 최대이송의 40%를 제안할 수 있다. 이러한 제안은 최소 절삭깊이의 이송을 기준 이송값의 0~255%까지 override 가 가능한 대상 모델의 특성이 고려되었기 때문이다.

표 1 출력범위 내의 절삭깊이에 따른 최대이송

주축의 회전속도 [rpm]	최대절삭동력 (P <sub>C max</sub> ) [W]	MRR <sub>max</sub> [mm <sup>3</sup> /s]	P <sub>C max</sub> 일 때 절삭깊이에 따른 f <sub>max</sub> [mm/rev]	
			절삭깊이가 1.0mm 일 때	f <sub>max</sub> 의 40%
600	3225	806.25	0.435	0.174
800	4250	1062.5	0.4299	0.172
1000	5250	1312.5	0.425	0.17
1200	6300	1575	0.4248	0.17
1400	6300	1575	0.364	0.146
1600	6100	1525	0.309	0.123
1800	5750	1437.5	0.259	0.103
2000	5450	1362.5	0.22	0.088

또한 이송값을 최초의 작업을 행할 때 기준 이송값( $f_0$ )으로 설정하고, 이때 측정되는 절삭력을 기준 절삭력으로 설정하여도 주축 전동기의 출력 범위 내에서 가공이 가능하다.

### 3.2 기준 절삭력과 기준 이송의 설정

다음으로 앞에서 제시된 방법을 이용하여 기준 절삭력과 기준 이송을 주축 출력범위 내에서의 설정 관계를 나타낼 수 있다.

절삭공정에 있어서 모든 가공물에 대한 비에너지 (specific energy:  $u_c$ )가 존재한다<sup>[15,16]</sup>. 그러나 비에너지는 매번 절삭조건에 따라 바뀌므로 일정하지 않다. 그래서 일반적으로 비에너지를 선정 한 후 절삭 작업시 보정할 수 있는 식을 제안할 수 있다.

$$P_{C0} = MRR \cdot u_c = MRR_0 \cdot \bar{u}_c \quad (4)$$

여기서, 이론상으로  $u_c$ 와  $\bar{u}_c$ 가 같아야 하지만 실제로는 같지 않( $u_c \neq \bar{u}_c$ )에 다음 식(5)에서와 같이 보정할 수 있다.

$$\frac{\bar{f}}{f_0} = \left( \frac{\bar{u}_c}{u_c} \right)^{-1} \quad (5)$$

따라서, 식(5)에서 보정된 이송을 기준이송( $f_r$ )으로 선정할 수 있다.

$$f_r = \bar{f} \quad (6)$$

그러나, 기준 절삭력( $F_r$ )은  $a_0$ 와  $f_0$ 로 절삭할 때 측정되거나 추정된 절삭력을 기준 절삭력으로 선정하면 보정된 기준이송으로 충분히

원활한 절삭 가공이 이루어질 수 있다. 이때의 출력은 그림 1에서와 같이 주축 전동기의 연속 출력 범위 내에서 작업이 이루어지게 된다. 또한 주축 모터 출력 특성을 고려한 절삭속도와 절삭깊이 그리고 이송과의 관계는 아래의 그림 2와 같으며, 이러한 관계는 ISO 3685<sup>[21]</sup>에서 제시된 절삭 공구 수명(Limits of cutting condition)에 관련된 규격에 적합하게 설정하였다.

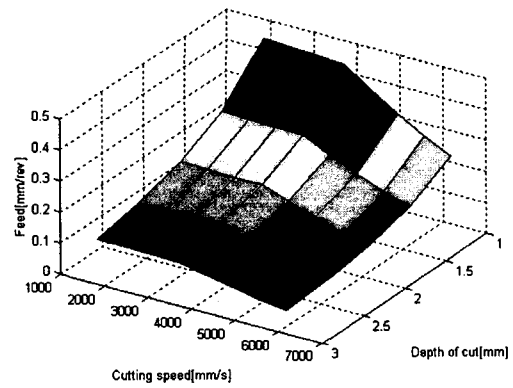


그림 2 출력특성에 근거한 절삭 가능 범위

기준 절삭력과 기준이송을 선정하기 위한 예비절삭시의 데이터는 다음의 절삭조건을 선정하여 결정하였다. 사용공구는 CNMG coated insert를 사용하였고, 절삭소재는 SM45C와 stainless steel(SUS304)를 이용하였으며 그 결과는 아래의 표2와 같다. 여기서 주축 회전수는 600rpm으로 하였으며, SUS304의  $u_c$ (비에너지)는  $5.5W \cdot s/mm^2$ , SM45C의  $u_c$ 는  $4.0W \cdot s/mm^2$ 로 하였다<sup>[15,16]</sup>.

표 2 실험에 의한 기준 절삭력과 이송

절삭소재	SM45C		SUS304	
	1.5mm	2.0mm	1.5mm	2.0mm
절삭깊이	1.5mm	2.0mm	1.5mm	2.0mm
P <sub>cu</sub> [W]	1522.4	1773.2	1394.9	1632.5
F <sub>c</sub> [N]	643	792	514	704
MRR <sub>0</sub>	433.73	645	364.2	467.1
$u_c$	3.51	2.749	3.83	3.49
$f_0$	0.174	0.174	0.126	0.126
$f$	0.198	0.2532	0.181	0.198

위의 표 2에서 결정된  $\bar{f}$ 를 기준이송( $f_r$ )으로

하여 연속적인 절삭가공을 주축 전동기의 출력범위 내에서 일정한 절삭력을 유지하며 작업을 수행할 수 있다.

#### 4. 기준 절삭력에 따른 제어

절삭력 제어를 위한 실험 장치로는 CNC 선반, Data acquisition board, 공구 동력계, 펜티엄 PC 등으로 구성되어 있다. 절삭력 실험은 통일중공업의 TSL-6UM CNC 선반을 사용하였고, 공구 동력계는 Kistler 사의 5019A 전하증폭기를 가진 Kistler 9121 모델로 실제 절삭력을 측정 비교하는데 사용하였다. 본 시스템에서 CNC 선반과 컴퓨터와의 인터페이싱을 위해 사용하고 있는 Data acquisition board는 Data Translation Co.의 DT2836 모델이다. 이 Board는 본 연구에서 사용하는 펜티엄 PC 환경에서 사용할 수 있는 것으로 8개의 A/D 채널, 2개 D/A 채널, 8bit의 디지털 I/O 그리고 16bit 분해능을 가진다. 그리고 데이터를 샘플링 할 수 있는 최대 속도는 33kHz이다.

절삭력 추정과 제어에 이용한 신호는 AC 전동기 속도, 전동기 출력, 전동기 입력전류( $i_u, i_v$ ), 전동기 입력 전압( $v_u, v_v, v_w$ )이고 모든 신호는 기존의 선반에 장착된 스핀들 드라이브에서 직접 측정하였다. 모든 신호는 1kHz로 샘플링하고 500Hz 이내의 주파수를 통과하도록 필터링을 하고 평균을 취해 20Hz 신호로 계산하였다. 이송 속도 오버라이드는 8 비트 디지털 신호로 0~255%까지 1%단위로 제어가능하다.

본 연구에서 제시된 방법에 의해 기준 이송과 기준 절삭력을 선정하여 퍼지 논리를 적용 일정 절삭력을 제어하는 실험을 수행 하였으며 사용된 퍼지룰은 아래의 표 3과 같고, 이때 이전의 연구<sup>[18, 19]</sup>에서 제시된 추정된 절삭력을 이용하였다.

이송속도의 변화에 따른 절삭력의 특성은 매우 비선형적이고 시변이므로 퍼지 제어기를 적용하였다. 퍼지 제어기의 기본 구성은 퍼지화부, 퍼지 제어 규칙부, 퍼지 추론부, 비퍼지화부로 되어 있으며<sup>[10, 17]</sup>, 퍼지화는 측정된 데이터의 명확한 값을 퍼지집합론을 기본으로 하는 수치적인 입력값으로 변화한다.  $e, \Delta e, \Delta u$ 를 언어 값으로 변환하기 위해 삼각형 소속 함수를 사용하고 여기

서 쓰이는 변수는 기준 절삭력과 측정 절삭력 사이의 오차와 오차의 변화량 그리고 이송 오버라이드이다. 제어 입력인  $e$ 와  $\Delta e$ 를 퍼지화 대표값으로 바꾸어 주고 제어 출력인  $\Delta u$ 를 비퍼지화 대표값으로 바꾸어 주기 위해 스케일 계수를 선정한다. 입력 변수와 출력 변수 사이의 관계를 퍼지 제어 규칙으로 구성한다. 퍼지 제어기의  $e$  값과  $\Delta e$  값에 곱해지는 input scaling factor 값과  $\Delta u$  값에 곱해지는 output scaling factor 값은 여러 번의 시뮬레이션과 실험을 통하여 결정하였다. 퍼지 제어 규칙은 절삭력 오차와 오차의 변화율에 의해 이송 오버라이드의 크기가 결정되게 구성되어 있다. 퍼지 추론법으로는 만다니 퍼지 암시 방법을 사용하였다. 비퍼지화는 퍼지값으로 되어 있는 출력값을 실제 적용할 수 있는 명확한 출력값으로 바꾸어 준다. 비퍼지화는 만다니 추론법에서 주로 사용하는 무게 중심법을 사용하였다.

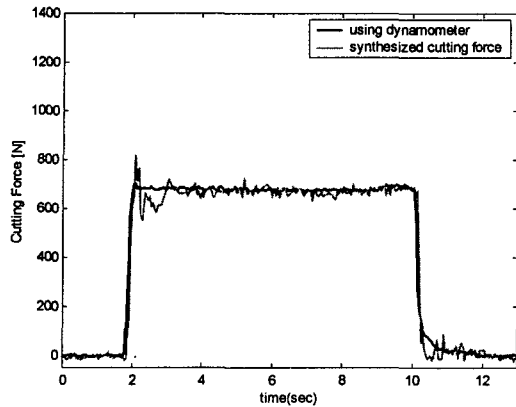
표 3 퍼지룰

$\Delta e$	$e$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	ZE
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB	PB

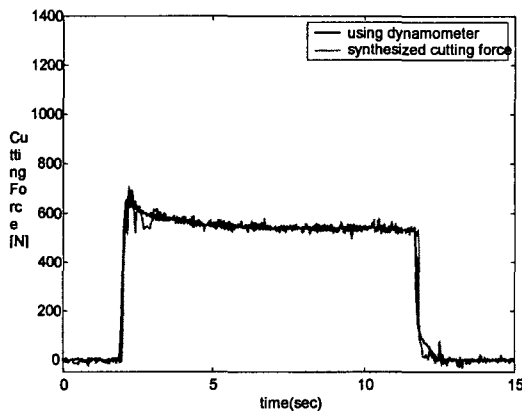
우선 첫번째 실험으로 SM45C 탄소강을 대상으로 기준이송을 앞에서 제시한 보정된 기준이송(0.198mm/rev)을 적용하였고, 기준 절삭력은 제시된 방법에 의해 643N으로 선정하였다.

두번째로 SUS304 스텐인리스 강을 대상으로 기준이송(0.181mm/rev)과 기준 절삭력을 514N으로 선정하여 제어 실험을 하였다.

1) 공작물 재종: SM45C,  $f_r$ :0.198mm/rev,  $F_r$ :643N, 주축 회전속도:600rpm, depth of cut:1.5mm



2) 공작물 재종: SUS304,  $f_r:0.181\text{mm/rev}$ ,  $F_f:514\text{N}$ , 주축 회전속도:600rpm, depth of cut:1.5mm



절삭력 제어 실험은 위의 그림과 같은 결과를 보였다. 따라서 본 연구에서 제시된 방법으로 설정된 기준 절삭력과 이송에 의해서 제어가 용이함을 알 수 있었다.

#### 4. 결론 및 고찰

절삭공정에서의 절삭력 신호의 온라인 실시간 정보는 절삭력 제어에 있어서 가장 중요한 요인으로 작용한다. 주축 모터의 출력 특성을 고려하여 절삭조건을 선정하고 이에 적합한 기준 절삭력과 이송을 선정하였다. 주축 전동기의 출력 범위내에 근거하여 제안되어지는 이송을 기준으로 예비 절삭시 발생하는 절삭력을 기준 절삭력으로 결정하고 이때 보정되는 이송을 기준이송으로 결정하여 일정한 기준 절삭력을 유지하여 최상의 절삭 가공조건을 선

정할 수 있다. 이와 같은 연구를 통하여 기존의 산업현장에서의 숙련된 작업자에 의존하던 절삭공정을 CNC 공작기계의 절삭정보를 이용하여 무인자동화에 적합한 생산환경의 조성이 가능할 것이다. 또한 CNC 공작기계의 기본적인 절삭 정보를 통한 공구 수명과 마모등의 예측에 대한 연구가 이어져야 한다.

현재 대부분의 산업현장에서는 기계가 가지고 있는 최대 출력보다 낮은 영역에서 생산공정이 이루어지므로 본 연구에서 제안하는 방식이 효율적으로 활용될 수 있을 것으로 생각된다. 또한 기존의 현장 기술자에 의해 가공되던 방식을 퍼지 논리 제어를 이용하여 가공하게 되므로, 향후 지능형 생산 시스템(IMS : Intelligent Manufacturing System)과 유연생산 시스템(FMS : Flexible Manufacturing System)등에 적극 고려 반영 되어질 수 있다.

#### 참고 문헌

1. Tlusty, J. and Andrew, G.C., 1983, "Acritical Review of Sensors for Unmanned Machining", *Annals of the CIRP*, Vol.32, No.2, pp.563-572
2. Weck, M., 1983, "Machine Diagnostics in Automated Production", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 2, No. 2, pp. 101-106.
3. Datsko, J., 1978, *Material Properties and Manufacturing Processes*, Jone Wiley & Sons, Inc.
4. Nair, R., Danai, K., and Malkin, S., 1990, "Turning Process identification Through Force Transients," *Automation of Manufacturing Processes*, The Winter Annual Meeting of the ASME, Dallaas, Texas, pp.59-66.
5. Stein, J.L. and Wang, C.H., 1990, "Analysis for Power Monitoring on AC Induction Drive Systems", *Transaction of ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 112, pp. 239-248, June.
6. Stein, J.L. and Huh, K., 1992, "A Model-Based Monitor Design For Estimating the Cutting Force In A Lathe", submitted to ASME Transactions: *Journal of Engineering for Industry*.
7. Spiewak, S.A., "Acceleration based indirect force measurement in metal cutting processes," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 35, No 1, pp. 1-17, 1995.
8. Shiraish, M. and Aoshima, S., "Sensorless in-process

- measurement of instantaneous depth of cut and cutting force in turning,” Proc. American Control Conf., pp. 155-159, 1997.
9. Huh, K., Jung, J. and Lee, K., “A Cutting Force Monitoring System based on AC spindle Drive,” Proceedings of the American Control Conference, pp. 3013-3017, 1998.
  10. Huang, S. and Chiou, K., “ The application of neural networks in self-tuning constant force control,” Int . J. March. Tools Manufact., Vol.36, No.1, pp. 17-31, 1996.
  11. Nassa, S.A. and Unnewehr, L.E., Electro mechanics and Electric Machines, 2th Ed., John Wiley and Sons, 1983.
  12. Koren, Y., “Control of Machine Tools,” Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 119, pp. 749-753, 1997,
  13. Q. Meng, J. A. Arsecularatne, and P. Mathew., “Calculation of optimum cutting conditions for turning operations using a machining theory,” Int. J. of Machine Tools and Manufacture, Volume 40, Issue 12, , Pages 1709-1733, September 2000
  14. B. Arezooa, K. Ridgwayb and A. M. A. Al-Ahmaric, “Selection of cutting tools and conditions of machining operations using an expert system,” Computers in Industry, Volume 42, Issue 1, Pages 43-58, June 2000
  15. Kalpakjian, Serope, Manufacturing process for engineering materials, 3<sup>rd</sup> Ed., Addison Wesley, 1997.
  16. Kalpakjian, Serope, Steven R. Schmid, Manufacturing engineering and technology, 4<sup>th</sup> Ed. Prentice-Hall, 2001.
  17. Li-Xin Wang, A Course in fuzzy systems and control, Prentice-Hall, 1997.
  18. 박장호, 김재욱, 허건수, “모델에 근거한 선삭력 모니터링,” 한국공작기계학회 추계학술대회, 1999. 10.
  19. 김재욱, 허건수, “추정된 절삭력 신호를 이용한 선삭력 제어,” 한국정밀공학회지, 제17권, 제5호, pp.173-179, 2000. 5.
  20. Kunsoo Huh, Kangkyu Lee, Cutting Force Estimation Systems Based on AC Spindle Drive,” JSME International Journal, Vol.43, No.1, pp230-236, March 2000.
  21. ISO, Tool-life testing with single-point turning tools, ISO Standard 3685, 1993.