

CNC 선반에서의 절삭력 감지 시스템 개발

허건수*, 이강규**, 김재욱***

Development of a Cutting Force Monitoring System for a CNC Lathe

K. Huh*, K. Lee**, and J. Kim ***

ABSTRACT

Monitoring of the cutting force signals in cutting process has been well emphasized in machine tool communities. Although the cutting force can be directly measured by a tool dynamometer, this method is not always feasible because of high cost and limitations in setup. In this paper an indirect cutting force monitoring system is developed so that the cutting force in turning process is estimated based on a AC spindle drive model. This monitoring system considers the cutting force as a disturbance input to the spindle drive and estimates the cutting force based on the inverse dynamic model. The inverse dynamic model represents the dynamic relation between the cutting force, the motor torque and the motor power. The proposed monitoring system is realized on a CNC lathe and its estimation performance is evaluated experimentally.

Key Words : tool dynamometer (공구동력계), cutting force (절삭력), AC induction motor (교류유도 전동기), off line test (오프라인 테스트), friction torque increase (마찰토크 증가량), spindle-drive (주축드라이브)

1. 서론

절삭 과정에서 절삭력 정보의 중요성은 그동안 공작기계 분야에서 익히 강조되어 왔다. 특히 온라인, 실시간의 주절삭력 정보는 공구 파손을 예측하고 마모를 감지하며 그 밖의 다른 오 동작을 검출해 내는 데 있어 매우 중요한 것으로 잘 알려져 있다^(1,2). 절삭력에는 주절삭력과 이송분력, 그리고 배분력의 세가지 성분이 있는데, 주절삭력은 일반 절삭의 경우 이 세가지 성분 중 큰 것으로서 가장 중요한 정보로 여겨진다.

공작기계의 절삭력은 공구 동력계로 직접 측정이 가능하다. 그러나 거친 기계적 환경에서 견딜수 있는 공구 동력계의 가격이 워낙 비싸고 공구동력계의 제한된 주파수 대역폭이 실제 절삭력의 주파수를 바꿀수 있는 센서 기술의 문제점⁽³⁾, 그리고 공구동력계 설치로 인한 강성의 감소로 떨림 현상과 치수 오차 발생에 따른 가공 품질의 저하 등으로 인해 공구 동력계를 이용하는 것이 항상 가능한 것은 아니다.

본 논문에서는 위에서 언급된 공구 동력계에 의한 직접 측정 방식 대신에 공작기계의 주축 드라이브 모

* 한양대학교 기계공학부
** 한국과학기술연구원
*** 한양대학교 대학원

델을 이용하여 절삭 가공 시의 절삭력을 간접적으로 추정할 수 있는 방식을 개발하고자 한다. 이 방식은 기존의 다른 추정 방식과는 달리 절삭 조건, 가공 소재, 절삭 공구의 종류에 관계없이 절삭력을 추정할 수 있고, 특별한 센서가 따로 필요 없이 기존의 CNC 공작기계에 이미 장착되어 있는 로터리 엔코더와 같은 기본적인 센서만을 이용하여 개발할 수 있으므로 산업 현장에서의 유용성이 매우 높다.

모델에 기초한 감지 시스템은 그동안 기계 진단 분야에서 널리 이용되어 왔는데, 그 원리는 기계적 오류를 모델 파라미터의 변화나 상태의 변화로서 나타낼 수 있다는 것이다. 본 논문에서는 바로 이러한 원리를 이용하여 최근 대부분의 CNC 선반에 사용되고 있는 교류 주축 드라이브(AC Spindle-Drive)의 모델을 이용하여 절삭 가공 시의 절삭력을 간접적으로 추정할 수 있는 방식을 개발하고자 한다. 그동안 많이 시도되어 왔던 방법으로는 절삭 현상의 원리를 수학적 으로 모델화하여 절삭력을 추정해 내는 방식들을 들 수 있다^(3,4). 그러나 이 방식들은 절삭조건에 근거하여 절삭력이 계산되므로 가공소재, 공구 등에 따라 모델 변수들이 튜닝되어야 하는 번거로움이 있다. 본 연구에서 제시하고자 하는 간접 모니터링 방식은 공작기계의 구동부를 대상으로 하였으므로 가공 소재와 공구의 조합이나 절삭 조건에 상관없이 적용할 수 있다는 큰 장점을 지니고 있다.

절삭력을 모니터링하기 위한 교류 유도 전동기 시스템의 모델은 이미 보고된 바 있으나 주로 밀링 머신의 등속도 시스템 모델이었고, 더군다나 비선형 요소를 고려하지 않은 선형화된 모델이었다⁽⁵⁾. 이러한 모델은 절삭 가공 중 공구와 공작물간의 가해진 힘, 마찰력, 절삭온도, 절삭시간에 따라 변하는 감쇠계수, 마찰 토크 등의 비선형 요소를 표현할 수 없어 정확한 절삭력 모니터링 방식에 적용되는데 제약이 있다. 또한 동기 교류 모터를 사용하는 CNC 머시닝센터에서 전류를 이용하여 절삭력을 간접적으로 추정한 연구^(8,9)도 보고된 바 있으나 주로 정상상태에서의 모델을 이용하였고 또한 마찰력 특성이 자세히 고려되지는 못하였다. 따라서 본 연구에서는 가공중 발생하는 속도 변화까지 고려하여 교류 유도 전동기 시스템에 대한

동적모델을 유도하고 이 모델을 토대로 절삭력 감지 방식을 개발하였다.

2. 교류 유도 전동기 주축 구동 시스템

본 연구에서 설계하고자 하는 절삭력 모니터링 시스템은 공작기계의 주축 구동 전동기를 제어하기 위해 이미 설치되어 있는 센서의 출력값을 이용하는 것이므로 쉽게 측정이 가능한 전동기 각속도, 고정자 전압(전동기 입력 전압), 고정자 전류(전동기 입력 전류)가 나타내는 범위를 Fig.1 과 같이 시스템 경계로 결정하였다.

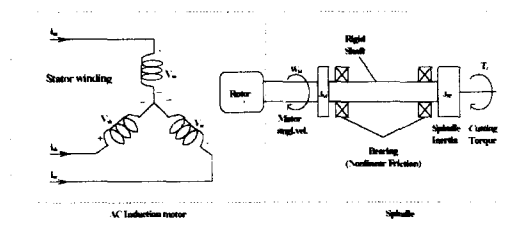


Fig. 1 Model for the AC spindle-drive

위에서 결정한 시스템 경계를 토대로 측정 가능한 신호와 절삭력 신호와의 관계를 위해서 모니터링 모델이 선정된다. 모니터링 모델은 기계적인 부분(주축 드라이브)과 전기적인 부분(교류 유도 전동기)으로 구성되며 기본적인 모델식은 다음과 같다.

$$J \frac{d\omega_M}{dt} + B\omega_M = \frac{P_o}{\omega_M} - T_l \quad (1)$$

여기서 J : 모터에 의한 총 등가 관성계수 [Nms²]

B : 등가 감쇠계수 [Nms]

P_o : 전동기 출력 [W]

ω_M : 스피들 모터 속도 [rad/s]

T_l : 모터에 가해지는 총 토크 [Nm]

3. 모니터링 방식의 설계

3.1 모니터링 모델식

앞의 2 장에서 구한 모니터링 모델 식(1)의 T_i 는 전동기에 가해지는 총 토크로서 다음과 같다.

$$T_i = T_{fc0} + \delta T_f + T_c = T_{fc0} + \delta T_{fc} + \delta T_{fv} + T_c \quad (2)$$

여기서 T_c : 절삭 토크

T_{fc0} : 무부하시 쿠울롱 마찰 토크

δT_f : 절삭 부하에 의한 마찰 토크 증가량

δT_{fc} : 절삭 부하에 의한 쿠울롱 마찰 토크 증가량

δT_{fv} : 절삭 부하에 의한 점성 마찰 토크 증가량

총 토크를 추정하기 위한 식(1)은 T_i 에 관한 식으로 바꾸어 쓰면 다음과 같이 표현된다.

$$T_i = \frac{P_o}{\omega_M} - B\omega_M - J \frac{d\omega_M}{dt} \quad (3)$$

위 식(3)의 우변에 있는 모든 변수들을 결정하면 전동기에 가해지는 총 외부 토크 T_i 를 구할 수 있고, 이로부터 식(2)에서 비선형 마찰 토크 증가량의 모델만 구해지면 절삭 토크를 계산해 낼 수 있다.

3.2 모니터링 모델 변수의 결정

3.2.1 오프라인(off-line) 변수들의 결정

무부하시 쿠울롱 마찰 토크 (T_{fc0})

절삭을 하지 않는 무부하 정상 상태에서 모델의 선형 변수들을 결정할 수 있다. 정상상태 ($d\omega_M / dt = 0$)에서 식(1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_o = T_{fc0} \omega_M + B \omega_M^2 \quad (4)$$

주축 전동기로부터 측정된 P_o 와 ω_M 의 값을 Fig 2 와 같이 도시하고 위 식 (4)에 대입해서 P_o 의 ω_M 에

대한 2 차 곡선을 그리면 이때 fitting 된 2 차 곡선의 1 차항의 계수는 바로 T_{fc0} 가 된다 ($T_{fc0} = 0.8156$ [Nm]). 여기서 fitting 된 식의 2 차항의 계수는 B 가 되지만 동일한 속도로 구동 시키더라도 온도에 따라 전동기 출력에 차이가 나는 것이 관찰되었다. 이는 절삭토크가 모터에 가해지지 않는 상태이므로 오직 마찰의 영향 때문이라고 할 수 있고 기계를 작동시킬 때마다 B 값이 변하는 것을 의미한다. 따라서 등가 감쇠 계수 B 는 절삭할 때마다 보정해 주어야 한다.

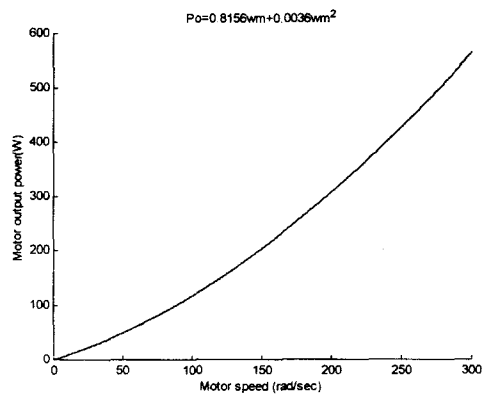


Fig. 2 Steady-state spindle test without cutting

비선형 마찰 토크 변수의 결정 (δT_f)

주축 전동기에 가해지는 총 외부 토크는 식(2)와 같이 구성된다. 점성 마찰 토크와 쿠울롱 마찰 토크의 증가량의 합 ($\delta T_{fc} + \delta T_{fv}$) 은 절삭을 하는 동안 주축 전동기에 가해지는 총 외부 토크의 약 30-80%에 이를 정도로 무시할 수 없는 값이라고 이미 연구된 바 있다⁷⁾. 따라서 비선형 마찰 토크 증가량 모델을 얻기 위해서 다음과 같이 전동기의 기저속도 전과 후로 나누어 총 12 개의 서로 다른 절삭 속도에서 다른 절삭 깊이로 절삭 테스트를 수행하였는데 실험에는 직경 60mm 의 SM 45C 탄소강을 사용하였고 공구는 피복 초경 공구를 사용하여 절삭토크 T_c 와 비선형 마찰 토크 증가량 δT_f 의 관계를 Fig3 과 Fig4 와 같이 규명하였다. 일반적으로 전동기는 기저속도를 중심으로 해서 다른 특성을 나타내는데 마찰 토크 증가량도

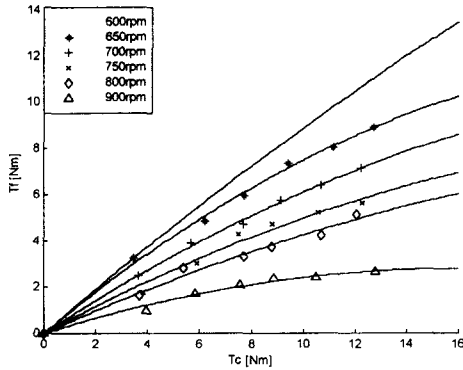


Fig. 3 Nonlinear friction torque increase with cutting (below the base speed)

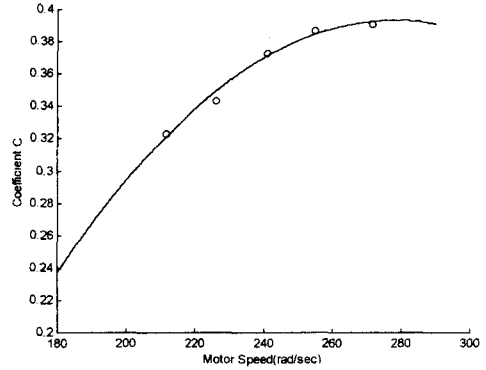


Fig. 5 Curve fitting of coefficient C (below base speed)

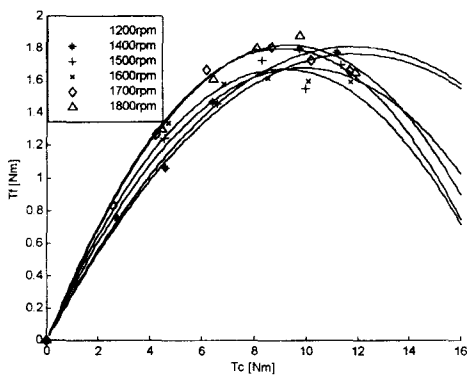


Fig. 4 Nonlinear friction torque increase with cutting (above the base speed)

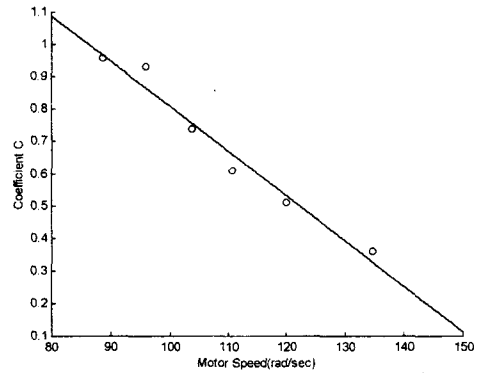


Fig. 6 Curve fitting of coefficient C (above base speed)

기저속도를 중심으로 해서 다른 양상을 나타내고 있다.

$$\delta T_f = C * T_c + D * T_c^2 \quad (5)$$

기저속도 이전과 기저속도 이후에서 얻은 데이터를 커브 피팅 하여 식(5)의 C와 D의 계수를 알아낼 수 있다. 그리고 얻어진 fitting 식들을 속도가 변하더라도 항상 적용하기 위해서 C와 D를 주축 속도의 함수로 Fig.5, Fig.6 그리고 Fig.7 과 같이 다시 fitting 하였다.

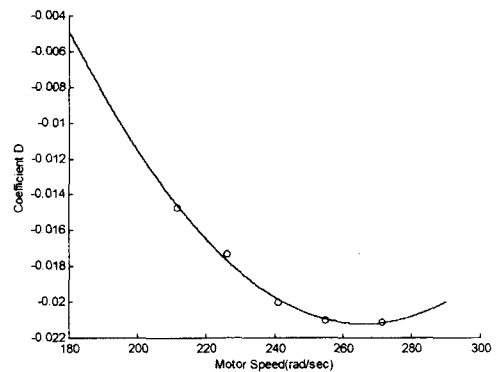


Fig. 7 Curve fitting of coefficient D (above base speed)

커브 피팅 결과를 정리하여 식(5)에 대입하면 본 연구에서 대상으로 하는 CNC 선반의 주축 마찰 토크 증가량의 최종적인 관계식은 다음과 같다.

기저 속도(base speed) 이전

$$\delta T_f = (2.20251 - 0.0139 * \omega_M) * T_c - 0.00666 * T_c^2$$

기저 속도(base speed) 이후

$$\delta T_f = (-0.0655 + 0.00247 * \omega_M - 0.0000028 * \omega_M^2) * T_c + (0.0203 - 0.00023 * \omega_M + 0.00000027 * \omega_M^2) * T_c^2$$

3.2.2 온라인(on-line)변수의 결정(감쇠계수 B)

전동기 측에서 바라본 등가 감쇠계수는 온도 변화와 그 밖의 다른 제어 불가능한 상태에 매우 민감한 것으로 알려져 있다. 따라서 그 값을 주기적으로 측정해서 보정해 주어야 하는데 공구가 가공물에 닿기 바로 직전의 정상상태에서 이 측정을 수행하는 것이 가장 편리하고 보정식은 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$B = \frac{P_o - T_{fc0} \omega_M}{\omega_M^2} \quad (7)$$

3.3 모니터링 방식 설계

이제 모니터링 모델의 모든 변수들이 결정되었으므로 절삭력을 추정하기 위한 모니터링 방식의 설계가 가능하다. 식(1)을 정리하고 여기서 새로운 변수 $U(t)$ 를 식 (8)와 같이 정의하면,

$$U(t) = \frac{P_o(t)}{\omega_M} - T_{fc0} \quad (8)$$

식(1)을 다음과 같은 입력/출력 모델로 정리할 수 있다.

$$J \frac{d\omega_M(t)}{dt} + B\omega_M(t) = U(t) \quad (9)$$

위 식(9)에 ZOH(Zero Order Hold)를 적용하여 샘플링 타임(sampling time)이 h 인 이산화된 식으로 표현하면 식(10)과 같이 나타낼 수 있다. ⁽¹¹⁾

$$\frac{\omega_M(z)}{U(z)} = \frac{K(1 - e^{-h/L})}{z - e^{-h/L}} = \frac{b}{z + a} \quad (10)$$

여기서 $a = -e^{-h/L}$,

$$b = K(1 - e^{-h/L}) = K(1 + a)$$

$$L = J / B, K = 1 / B$$

여기서 절삭가공 직전에 RLS(Recursive Least Square) 알고리즘을 이용하여 a, b 값을 얻을 수 있고 또 이 값들에 의해 총 등가 관성 계수 J 와 감쇠 계수 B 를 결정할 수 있다. 위의 결과를 이용하여 식 (1)에 적용하면 전동기에 가해지는 총 외부 토크 추정 알고리즘은 다음의 이산 방정식에 의해 구해진다.

$$\hat{T}_r(i) = \frac{P_o(i)}{\omega_M(i)} - \frac{1}{b} \{ \omega_M(i) - \omega_M(i-1) \} - B\omega_M(i) \quad (11)$$

여기서 식(6)에서 구해진 비선형 마찰 토크 증가량 값을 이용하여 타임 스텝 (i)에서의 주절삭 토크를 계산할 수 있다.

$$\hat{T}_c(i) + C * \hat{T}_c(i) + D * \hat{T}_c(i)^2 = \hat{T}_r(i) - T_{fc0} \quad (12)$$

위 식은 \hat{T}_c 에 대한 2차 방정식으로 나타낼 수 있으므로 \hat{T}_c 에 대해 해석적인 해를 얻을 수가 있다. 그리고 다음식에 의해 절삭가공시의 절삭력을 구할 수 있다.

$$\hat{F}_c(i) = \frac{\hat{T}_c(i)}{n * r_w} \quad (13)$$

여기서 n : 속도전달비(transmission ratio)
(스핀들 속도 / 모터속도 = 2/3)
 r_w : 가공물 반경

4. 대상 CNC 선반의 구성

본 실험 장치에 사용하고 있는 공작기계는 매우 중공업 PUMA 6J CNC 선반으로서 2극 3상 교류 유도전동기를 주축 구동원으로 한다. 공구 동력계는 스위스 키슬러사의 9121 모델로 압전형이며 여기서 나오는

전하 신호를 전압 신호로 바꾸어 주는 전하 증폭기는 키슬러사의 5019A 모델을 사용하였다. 전하 증폭기에서 나오는 절삭력 신호와 주축 전동기 드라이브에서 나오는 전동기 속도, 전동기 출력 파워, 그리고 전류 신호는 A/D 변환기를 통해 컴퓨터로 읽어 들이고 이를 이용하여 소프트웨어적으로 절삭력을 추정한다. 측정된 절삭력 신호는 비선형 마찰 토크 증가량을 모델화하는 부분에 사용되고 또 최종적으로 설계된 모니터링 시스템의 성능평가에 사용된다.

5. 성능 평가

추정 절삭력은 측정된 전동기 속도와 전동기 출력 파워를 1000Hz로 샘플링한 다음 노이즈 특성을 고려해서 주파수 대역을 변하지 않고 최대한 노이즈를 제거하기 위하여 30Hz로 로우패스 필터링하여 설계된 모니터링 시스템을 적용하여 구했다. 총 100여회에 걸쳐 절삭력 모니터링 테스트를 한 결과가 Table 1에 요약되어 있으며 공구 동력계로 측정된 실제 절삭력과 오차는 정상 상태에서 평균 3% 이내이며 서로 다른 재료, 공구, 절삭조건 조합에 무관하게 절삭력을 잘 추종함을 알 수 있다. Fig.8, Fig.9 그리고 Fig.10은 절삭공구와 가공재료를 바꿔 가면서 여러가지 절삭조건에서의 절삭력 추종 실험 결과가 비교되어 있다. 천이구간에서 절삭력 측정값과 추정값 사이에 약간의 시간지연이 발생하는 데 이는 추정값 계산의 변수로 작용하는 모터의 시간역 출력 응답이 천이구간에서 시간지연이 일어나므로 발생한 결과며 이를 보정하는 것은 추후 연구로 진행중이다.

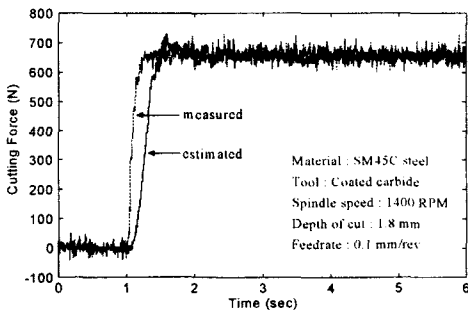


Fig. 8 Measured and estimated cutting force

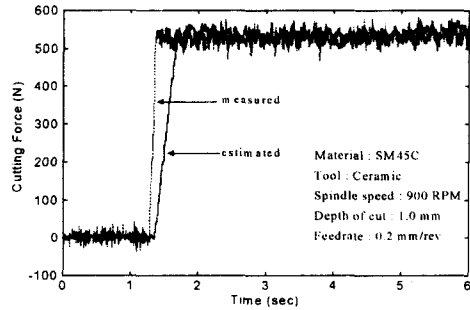


Fig. 9 Measured and estimated cutting force

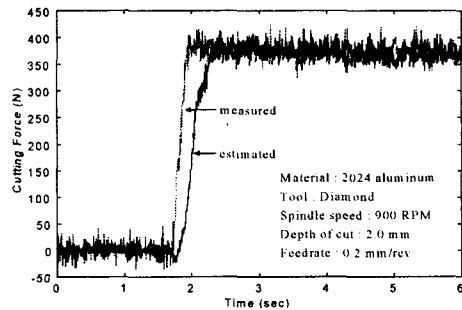


Fig. 10 Measured and estimated cutting force

Table 1. Average and the standard deviation of the estimation error

	Coated WC		CBN	
	Avrg (%)	Stdv (%)	Avrg (%)	Stdv (%)
SM45C	2.09	2.10	0.62	0.30
2024	2.84	2.21	2.07	1.74
SUS304	1.79	1.63	1.13	0.76
	Ceramic		Diamond	
	Avrg (%)	Stdv (%)	Avrg (%)	Stdv (%)
SM45C	0.67	0.42	•	•
2024	•	•	2.46	1.35
SUS304	0.45	1.57	•	•

6. 결론

1. 수차례의 절삭 테스트를 수행하여 공구 동력계로 측정된 절삭력 신호와 주축 전동기 드라이브에서 나오는 전동기 속도, 전동기 출력 파워 신호들을 이용해 온라인 변수와 오프라인 변수를 결정하였다.
2. 유도교류모터를 사용하는 주축 드라이브 모델을 바탕으로 간접적인 절삭력 모니터링 식을 개발하였으므로 별도의 하드웨어를 필요로 하지 않는다.
3. 절삭조건, 공구, 가공재료의 조합에 관계없이 적용이 가능하며 실시간 구성이 가능하다.
4. 수차례의 절삭 실험을 통하여 모니터링 방식의 타당성 검증하였으며, 모니터링 결과 과도상태의 모델링 오차로 약간의 시간 지연이 발생(약 0.3초)하나 정상상태에서의 오차는 평균 3% 이내로 추정하였다.

후 기

본 연구는 1997년도 교육부 학술 연구 조성비(기계공학 ME97-E-43)에 의하여 연구 되었음.

참고문헌

1. Tlusty, J. and Andrew, G. C., "A Critical Review of Sensors for Unmanned Machining," *Annals of the CIRP*, Vol. 32, No. 2, pp. 563-572, 1983.
2. Weck, M., "Machine Diagnostics in Automated Production," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 2, No. 2, pp. 101-106, 1983.
3. Datsko, J., *Material Properties and Manufacturing Processes*, Jone Wiley & Sons, Inc. 1978.
4. Nair, R., Danai, K., and Malkin, S., "Turning Process identification Through Force Transients," *Automation of Manufacturing Processes*, The Winter Annual Meeting of the ASME, Dallaas, Texas, pp.59-66, 1990.
5. Stein, J.L. and Wang, C.H., "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, 1990.
6. Stein, J.L. and Huh, K., "A Model-Based Monitor Design For Estimating the Cutting Force In A Lathe," submitted to *ASME Transactions: Journal of Engineering for Industry*.
7. Stein, J.L. and Shin K.-C., "Current Monitoring on Field Controlled DC Spindle Drives," *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, Vol.108, No. 4, pp. 289-295, Dec, 1986.
8. 김기대, 권원태, 주종남, "주축모터 전류를 통한 절삭력의 간접 측정 및 절삭력 추종제어," *한국정밀공학회지 제 14 권 제 10 호*, pp. 15-27, 1997.
9. 김기대, 이성일, 권원태, 주종남, "주축모터 전류 신호를 이용한 절삭력의 추정 및 이송속도 적응제어," *한국정밀공학회 추계학술대회 논문집*, pp. 150-156, 1996.
10. 정정주, "절삭력 모니터링 시스템을 위한 주축 드라이브 모델 개발," *한양대학교 대학원*, 1995.
11. Karl J. Åström and Björn Wittenmark, "Computer-Controlled Systems," *Prentice-Hall International, Inc.*