

모델에 근거한 전삭력 모니터링 Model-Based Monitoring of the Turning Force

허 건 수(한양대 정밀기계공학과), 김 재 옥(한양대 대학원), 박 장 호(한양대 대학원)
Kunsoo Huh (Hanyang Univ.), Jaeok Kim, Changho Pak (Graduate School, Hanyang Univ.)

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(주축 드라이브)

1. 서 론

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

공작기계의 절삭력은 공구 동력계로 직접 측정이 가능하긴 하지만 공구 동력계의 가격이 고가이며 센서 기술의 한계, 공학적인 제약 조건들, 그리고 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 모델을 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 타코미터와 같은 기본적인 센서만을 이용하여 개발할 수 있으므로 산업 현장에서의 유용성이 매우 높다.

2. 연구 배경

모델에 기초한 모니터링 시스템은 그동안 기계 진단 분야에서 널리 이용되어 왔는데, 그 원리는 기계적 요류를 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 수학적으로 모델화하여 절삭력을 추정해 내는 방식들을 들 수 있다^(3,4). 그러나 이방식들은 절삭조건에 근거하여 절삭력이 계산되므로 가공소재, 공구 등에 따라 모델변수들이 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 선형화 된 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. 따라서 본 연구에서는 가공 중 발생하는 속도변화까지 고려하여 교류 유도 전동기 시스템에 대한 동적모델을 유도하고 이 모델을 토대로 절삭력 감지 방식을 개발하였다.

3. 교류 유도 전동기 주축 구동 시스템

본 연구에서 설계하고자 하는 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 결정하였다.

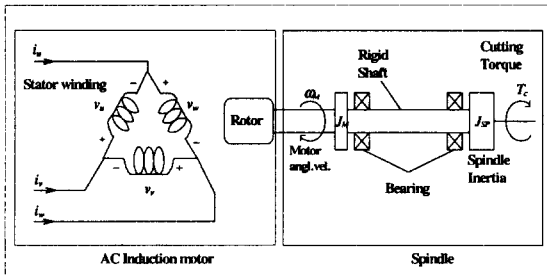


Fig. 1 모델 선정을 위한 시스템 경계

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(Fig. 1 참조).

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

여기서 J: 모터에 의한 총 등가 관성계수
 B: 등가 감쇠계수
 ω_M : 스피들 모터 속도
 P_o : 전동기 출력

T_i : 모터에 가해지는 총 토크

4. 모니터링을 위한 모델링

4.1 모니터링 모델식

앞의 3장에서 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

또한 T_i 에 관한 식은 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.

4.2 모니터링 모델 변수의 결정

4.2.1 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 위 식(4)에 대입해서 P_o 의 ω_M 에 대한 2차 곡선을 그리면 이때 fitting 된 2차 곡선의 1차항의 계수는 바로 T_{fc0} 가 된다 (base speed 이전 : $T_{fc0} = 3.1171$ [Nm], base speed 이후 : $T_{fc0} = 0.9031$ [Nm])(Fig. 2,3 참조).

여기서 fitting 된 식의 2차항의 계수는 B 가 되지만 동일한 속도로 구동 시키더라도 온도에 따라 전동기 출력에 차이가 나는 것이 관찰되었으며 이는 기계를 작동시킬 때마다 B 값이 변하는 것을 의미한다. 따라서 등가 감쇠 계수 B 는 절삭할 때마다 보정해 주어야 한다.

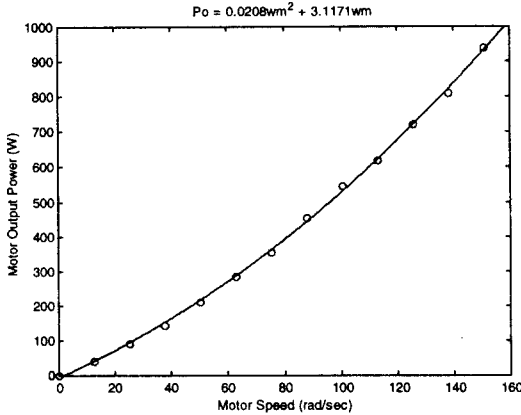


Fig. 2 무부하 정상상태 테스트(base speed 이전)

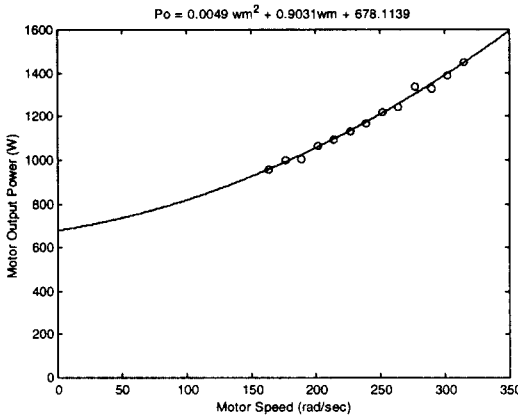


Fig. 3 무부하 정상상태 테스트(base speed 이후)

- 비선형 마찰 토오크 변수의 결정(δT_f): 주축 전동기에 가해지는 총 외부 토오크는 식(2)와 같이 구성된다.

점성 마찰 토오크와 쿠울롱 마찰 토오크의 증가량의 합($\delta T_{fc} + \delta T_{fv}$)은 절삭을 하는 동안 주축 전동기에 가해지는 총 외부 토오크의 약 30-80%에 이를 정도로 무시할 수 없는 값이라고 이미 연구된 바 있다. 따라서 비선형 마찰 토오크 증가량 모델을 얻기 위해서 다음과 같이 전동기의 베이스 속도 전과 후로 나누어 총 8개의 서로 다른 절삭 속도에서 다른 절삭 깊이로 절삭 테스트를 수행하였는데 실험에는 직경 60mm의 SM 45C 탄소강을 사용하였고 공구는 피복 초경 공구를 사용하여 절삭 토오크 T_c 와 비선형 마찰 토오크 증가량 δT_f 의 관계를 규명하였다. 일반적으로 전동기는 베이스 속도를 중심으로 해서 다른 특성을 나타내는데 마찰 토오크 증가량도 베이스 속도

를 중심으로 해서 다른 양상을 나타내고 있다.

5. 절삭력 감지 방식

절삭력 신호의 온라인 실시간 정보는 절삭력 제어에 있어서 가장 중요한 요인이다. 이전 연구에서는 AC 스핀들 드라이브 모델을 이용한 절삭력 감지 시스템을 개발하였고 AC 스핀들 드라이브의 동역학적 모델과 측정된 전동기 출력 신호를 이용하여 절삭력을 온라인으로 추정하였다⁽⁹⁾. 절삭력 추정 결과 정상 상태에서 오차는 평균 3% 이내로 추정하였고 과도 상태에서는 약간의 시간 지연(약 0.3 초)이 발생하였다. 여기서 시간 지연을 가지는 제어 변수는 제어 성능에 심각한 한계를 가져왔다. 절삭력 신호에서 시간 지연의 주요 원인은 측정된 출력 신호의 시간 지연이다. 왜냐하면 AC 전동기의 토크는 전동기 출력을 전동기 속도로 나눠 간단히 계산하므로 결과적으로 전동기 출력이 시간 지연으로 나타난다. 이 장에서는 과도 상태에서 추정 성능을 향상 시킨 합성된 절삭력 감지 방식을 제안한다. 모터 출력의 부적당한 측정이 시간 지연의 주요 원인이므로 AC 전동기의 특성을 사용하여 전동기 토크를 빠르게 추정하였다.

5.1 전동기 토크 계산

AC 유도 전동기는 고정자에 3상 전압이 인가되고 회전자에 유도전압이 발생하여 전류가 흐르면 이때 토크가 발생하여 전동기가 회전하게 되는 것이다. 여기서 전동기 출력 토크는 회전자의 입력과 동기 속도로 표현할 수 있다⁽¹¹⁾.

$$T_e = \frac{P_g}{\omega_s} \quad (5)$$

여기서 ω_s 는 유도 전동기의 동기 속도이다. 전동기 공극 전력 P_g 은 전동기 입력 P_i 에서 고정자 손실 전력 값을 뺀 값으로 나타낼 수 있다⁽¹¹⁾.

$$P_g = P_i - P_s = i_s^T v_s - i_s^T R_s i_s \quad (6)$$

여기서 P_i : 전동기 입력 전력
 P_s : 고정자 손실 전력
 i_s : 고정자 전류 = $[i_u \ i_v \ i_w]^T$
 v_s : 고정자 전압 = $[v_u \ v_v \ v_w]^T$
 R_s : 고정자 저항
 $i_u \ i_v \ i_w$: u, v, w 상의 고정자 전류
 $v_u \ v_v \ v_w$: u, v, w 상의 고정자 전압

델타권선으로 구성된 전동기에서 상전압은 선

전압과 같고 상전류는 선전류를 $1/\sqrt{3}$ 배이다. 일반적으로 AC 전동기의 입력은 식(7)과 같이 계산할 수 있다.

$$P_i = \sqrt{3} I_{line} V_{line} \cos \phi \quad (7)$$

여기서 $V_{line} = \sqrt{\frac{1}{3}(v_u^2 + v_v^2 + v_w^2)}$

$$I_{line} = \sqrt{\frac{1}{3}(i_u^2 + i_v^2 + i_w^2)}$$

$\cos\phi$: 선전류, 선전압 사이의 위상차($\phi = \pi/6$)

절삭이 시작될 때를 제외하고 스핀들 모터가 정상 상태에서 일정한 속도로 회전할 경우 슬립율은 매우 작은 값이므로 0 이라 가정하면 (5)식은 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$T_e \approx \frac{P_g}{\omega_M} \quad (8)$$

여기서 ω_M 은 전동기 속도이다. 절삭이 시작될 때 식 (6)에서 계산된 전동기 입력 값은 슬립율이 급격히 증가하므로 식 (8)로 대신하여 사용할 때 고려해야 한다.

5.2 절삭력 추정

AC 전동기의 출력 토크를 계산한 후 절삭력을 얻기 위한 추정 절차는 이전에 연구된 방법과 동일하고 자세한 설명은 Huh, et al.에 나와있다⁽⁹⁾. 3상 유도 전동기의 스핀들 드라이브의 모니터링 모델은 기계적인 부분(주축 드라이브)과 전기적인 부분(교류 유도 전동기)으로 구성되며 기본적인 모델식은 식(9)와 같다.

$$J \frac{d\omega_M}{dt} + B\omega_M = T_e - T_l \quad (9)$$

여기서 J :모터에 의한 총 등가 관성 계수
 B :등가 감쇠 계수
 T_l :모터에 가해지는 총토크

위 방정식을 ZOH 를 적용하여 이산화 된 식으로 표현하면 총외부 토크 추정 알고리즘은 다음의 이산 방정식에 의해 구해진다.

$$\hat{T}_l(i) = T_e(i) - \frac{1}{b}(\omega_M(i) - \omega_M(i-1)) - B\omega_M(i) \quad (10)$$

여기서 h 는 샘플링 시간(0.05 초)이고 b 는 모델 파라미터 $(= (1 - e^{-Bh/J})/B)$ 이다. 등가의 감쇠 계수는 온도의 변화에 민감하다고 알려져 있으므로 공구가 공작물에 닿기 바로 직전에 자동적으로

계산하도록 하였다⁽⁹⁾. 추정된 총외부 토크는 공작물에 작용하는 절삭 토크뿐만 아니라 스핀들 베어링의 비선형 마찰 토크도 포함한다.

$$\hat{T}_l = T_{fco} + \delta T_f + \hat{T}_c \quad (11)$$

여기서 \hat{T}_l :모터에 가해지는 총토크
 T_{fco} :무부하시 쿨롱 마찰 토크
 δT_f :절삭 부하에 의한 마찰 토크 증가량

쿨롱 마찰 토크 T_{fco} 는 절삭을 하지 않는 무부하 정상 상태에서 결정할 수 있다. 추정된 총외부 토크로부터 절삭 토크를 구하기 위하여 비선형 마찰 토크의 상세한 정보가 필요하므로 δT_f 와 \hat{T}_c 사이에 동역학적인 관계가 없다고 가정하면 비선형 마찰 토크는 다음과 같이 모델링 된다.

$$\delta T_f = f(\omega_M) \times \hat{T}_c + g(\omega_M) \times \hat{T}_c^2 \quad (12)$$

여기서 $f(\omega_M)$ 와 $g(\omega_M)$ 은 선반에 따른 전동기 속도 함수이다. 식 (5)과 식 (12)를 이용하면 추정된 절삭력은 Fig. 4 과 같이 나타난다. 기존 연구와 비교하면 추정된 절삭력은 과도 상태에서 아주 작은 시간 지연을 나타내고 정상 상태에서 진동이 심함을 알 수 있다⁽⁹⁾.

5.3 합성된 절삭력 감지 방식

이전 연구에서는 전동기 드라이브로부터 전동기 출력과 전동기 속도의 측정하여 절삭력 추정했다⁽³⁾. 그러나 이 성능은 과도 상태에서 시간지연을 발생시키므로 3.1 절과 3.2 절에서는 수정된 기법으로 과도 상태에서 성능을 향상시켰다. 수정된 감지 방법은 전동기 속도, 두개의 전류, 세개의 전압 신호의 측정이 필요하다. 수정된 감지 방법이 정상 상태에서는 진동이 심하므로 합성된 절삭력 감지 방식은 두 기법의 장점을 조합하여 사용한다. 절삭의 시작과 끝을 알기 위해 식 (6)에서는 계산된 출력과 측정된 출력 사이의 차를 이용하고 두 기법을 스위칭 할 수 있다. 만약에 두 값의 차가 양수이고 경계값을 초과하면 절삭력 추정은 수정된 기법을 사용하고 슬립율을 고려하기 위하여 약 0.2 초 정도 일정한 보상 값을 곱해준다.

$$\left| \frac{P_g(i) - P_o(i)}{P_o(i)} \right| > \Delta_{th} \quad (13)$$

합성된 감지 방식으로부터 추정된 절삭력은 측정된 절삭력과 함께 Fig. 5 에 나타나 있다. 따라서

추정 성능은 정상 상태에서 뿐만 아니라 과도 상태에서 만족할 만하다.

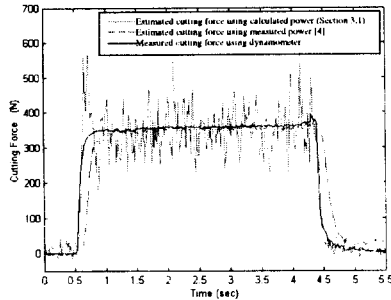


Fig. 4 Measured and estimated cutting force

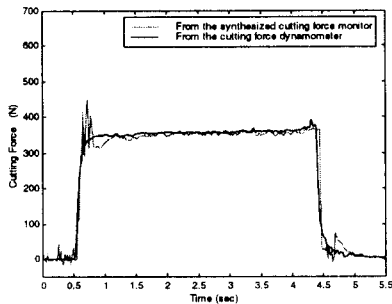


Fig. 5 Estimation from the synthesized monitor

6. 결론

1. 본 논문에서는 CNC 선반의 주축 드라이브 시스템을 본드 그래프를 이용하여 모델링 하였다.
2. 수 차례의 절삭 테스트를 수행하여 공구 동력계로 측정된 절삭력 신호와 주축 전동기 드라이브에서 나오는 전동기 속도, 전동기 출력 파워 신호들을 이용해 온라인 변수와 오프라인 변수 결정하였다.
3. 결정된 변수들을 토대로 최종적인 모니터링 시스템을 완성하였다. 본 모니터링 시스템은 별도의 하드웨어를 필요로 하지 않으며 절삭조건, 공구, 가공재료의 조합에 관계없이 적용할 수 있다.

참고 문헌

1. Tlustý, J. and Andrew, G.C., 1983, "A critical 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*, John 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, Dallas, 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., *Electromechanics 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,