다중 센서를 이용한 CNC 선반에서의 실시간 공구파손 감시에 관한 연구

안영진[†] · 김재열[‡]

조선대학교 첨단부품소재공학과

A Study on Real-time Tool Breakage Monitoring on CNC Lathe using Fusion Sensor

Young-Jin An[†] and Jae-Yeol Kim[‡]

Advanced Parts and Materials Engineering, Graduate School of Chosun University, Gwang-ju, South Korea
(Received March 15, 2012; Revised April 30, 2012; Accepted May 7, 2012)

Abstract – This study presents a new methodology for realtime tool breakage detection by sensor fusion concept of two hall sensor and an acoustic emission (AE) sensor. Spindle induction motor torque of CNC Lathe during machining is estimated by two hall sensor. Estimated motor torque instead of a tool dynamometer was used to measure the cutting torque and tool breakage detection. A burst of AE signal was used as a triggering signal to inspect the cutting torque. A significant drop of cutting torque was utilized to detect tool breakage. The algorithm was implemented on a NI DAQ (Data Acquisition) board for in-process tool breakage detection. The result of experiment showed an excellent monitoring capability of the proposed tool breakage detection system. This system is available tool breakage monitoring through internet also provides this system's user with current cutting torque of induction motor.

Keywords – induction motor(유도전동기), sensorless vector control(센서리스 벡터제어), cutting torque(절삭토크), cutting tool breakage(공구파손), fusion sensor(다중센서), torque monitoring(토크 모니터링)

1. 서 론

공작물의 절삭 과정에서 발생하는 공구파손, 공구마모, 채터(Chatter) 등은 공작물의 치수정밀도 및 표면조도와 밀접한 관계를 가지고 있으며, 이에 따라 절삭가공 중에 이를 감시할 수 있는 신뢰성 있는 모니터링 시스템이 요구되어 지고 있다.

절삭 가공 중에 발생하는 이상 현상을 검출하고, 이를 방지하여 원활한 가공을 수행하기 위한 연구는 NC 및 CNC 시스템이 일반화되기 시작한 1970년대부터 활발히 진행되었다.

그동안의 연구결과 절삭력은 절삭가공 중 이상 현상, 절삭부하 등의 상태를 감시하는 가장 정확한 방법으로 잘 알려져 있다. 절삭력을 측정하는 방법으로 공구동력계(Tool dynamo meter)를 이용하는 방법이 있으나, 설치비용, 공구교환, 절삭유사용, 배선 및 간섭 등의 다양한 문제가 있다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 비선형 특성을 지닌 유도전동기의 벡터제어 방법과 슬립주파수제어 방법 등을 응용하여 절삭가공 시 발생하는 절삭력과 토크를 간접적으로 추정하는 시스템이 연구되어 졌다[1-5]. 과거 유도전동기에 인가되는 전체 동력으로부터 토크를 추정하고, 이로부터 절삭력을 예측하는 연구도 이뤄졌으나 고정자와 회전자의 손실 및 내부 인덕턴스에 의한 손실 등으로 신뢰성을 확보할 수 없었다.

[†]주저자 : mintjini@jntp.or.kr

[‡]책임저자 : jykim@chosun.ac.kr

또한 이송 전동기에서 전류를 이용한 절삭력을 추정하는 방법으로 홀센서(Hall-Sensor)를 이용하여 전류를 측정하고, 계산된 rms값을 계산하여 토크와의 비례관계를 규명하는 연구가 국내에서 이뤄지기도 했다[6].

본 논문에서는 유도전동기에 인입되는 3상전류를 측정하여 유도전동기의 전기적 토크를 구하고 마찰계수와 절삭 부하에 의해 증가한 마찰력 함수 등을 포함한 기계부 모델링 해석을 통해 절삭토크를 추정하고, 추정된 절삭토크를 이용해 공구파손을 감시함으로써 위와 같은 문제를 해결하였다.

또한 하나의 센서로부터 얻어진 단순정보로는 여러 가지 절삭조건과 절삭과정 중 발생하는 다양한 이상 상태에 대한 정확한 변별력을 가지지 못하므로 추정된 토크와 AE(Acoustic emission) 센서를 함께 사용하여 공구 파손을 실시간으로 감시하는 다중센서(Fusion sensor) 알고리즘을 제안하였다.

2. 절삭토크 추정 및 공구파손감시 알고리즘

2-1. 절삭토크 추정

공구동력계를 사용하지 않고 유도전동기의 파라미터와 고정자 전류만으로 절삭토크와 속도 정보를 추정하기 위해서는 유도전동기의 정량적인 수학적 모델링이 선행되어야 한다.

벡터제어에 의한 절삭토크 추정을 위해 회전 자계방향으로 관측좌표축을, 동기회전 좌표계를 기준축으로 한 3상 유도전동기의 $d-q$ 전압방정식과 슬립각속도에 의한 유도전동기의 각속도를 추정할 수 있다[1].

유도전동기의 토크 추정모델은 전기부 모델과 기계부 모델로 구성되며, 구동계의 순수토크는 유도전동기의 전기적 토크(T_e)와 구동부의 총토크(T_i)의 관계식으로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다[3,4].

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

여기서, J 는 모터에 의한 등가 관성계수, B 는 등가 감쇠계수, ω_r 은 회전자 각속도

또한 유도 전동기에 발생하는 전기적 토크는 식 (2), 기계부에서 발생하는 부하토크는 식 (3)과 같고, 무부하 시 쿨롱마찰토크(T_{fc0}), 등가감쇠계수(B)의 값은 전기적 토크(T_e)와 회전자 각속도(ω_r)에 의해 구할 수 있다 [3,4].

$$T_e = \frac{3PL_m\lambda_r i_{qs}}{22L_r} = T_{fc0} + B\omega_r \quad (2)$$

$$T_i = T_{fc0} + \delta T_f + T_c \quad (3)$$

여기서, P 는 극수, L_m 는 고정자와 회전자의 상호인덕턴스, L_r 는 회전자의 인덕턴스, λ_r 은 회전자의 자속, δT_f 는 부하에 의한 마찰토크 증가량, T_c 는 절삭토크 따라서, 실험을 통해 절삭부하에 의한 마찰토크 증가량(δT_f)을 2차 커브 피팅 하여 C 와 D 의 변수를 구함으로써 절삭토크(T_c)를 추정할 수 있다. 절삭부하에 의한 마찰토크 증가량(δT_f)과 절삭토크(T_c)의 관계식은 식(4)와 같이 나타낼 수 있다. 실험에는 공작물로 SM45C와 CNMG 120408(T사) 타입의 상용 초경공구를 사용하였고, 식(5)에 의해 절삭토크(T_c)를 추정할 수 있다.

$$\delta T_f = C \times T_c + D \times T_c^2 \quad (4)$$

$$T_c(i) + CT_c(i) + DT_c(i)^2 = T_e(i) - B\omega_r - T_{fc0} \quad (5)$$

여기서, C 와 D 는 절삭속도에 따라 결정되는 변수

2-2. 공구파손감시 알고리즘

CNC선반의 전류신호에 의해 추정된 절삭토크의 경우 공구파손이외에도 주축유도전동기의 가감속, 기동, 정지, 공구이송 등에 따라 큰 토크 변화를 가져올 수 있다.

본 논문에서는 절삭토크와 상호보완적 정보를 가지

Fig. 1. Cutting tool breakage detecting algorithm.

고 있는 AE를 동시에 감시함으로써 보다 신뢰성 있는 공구파손을 검출하기 위해 Fig. 1과 같이 다중센서를 이용한 공구파손감시 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘에서는 공구파손에 의한 돌발 신호와 다른 원인에 의한 돌발 신호와의 정확한 변별을 위해, AE신호의 발생을 검출 기점으로 하여 절삭토크 변화의 감시하도록 하였다. 또한 실시간으로 공구의 파손감시를 위해 0.01 sec단위로 AE신호와 절삭토크 변화를 검출하고, 신호의 진동을 줄이기 위해 20개의 데이터 단위로 이동평균법을 적용하였다.

식(6)은 절삭가공시 발생하는 AE신호의 이동평균(AE_avg)을, 식(7)은 AE신호와 AE신호의 이동평균의 비(R_AE)를 각각 나타낸다. 또한 식(8)은 주축 유도전동기의 절삭토크의 전류신호로부터 추정된 토크의 이동평균(Te_avg)을, 식(9)는 절삭토크의 최대값(Te_max)과 토크의 이동평균(R_Te)의 비를 각각 나타낸다.

알고리즘에 따라 비돌발형 AE 신호의 한계값(TR_AE)보다 AE신호의 이동평균의 비가 클 경우 공구 파손에 따른 돌발형 AE신호로 인식하게 된다. 돌발형 AE신호가 공구파손에 기인한 것인지 다른 원인에 의한 것인지를 최종적으로 결정하기 위해 토크의 한계값(TR_Te)과 토크의 이동평균비를 비교하여 토크의 이동평균비가 토크의 한계값 보다 클 경우 공구가 파손된 것으로 정의하였다. 여기서 비돌발형 AE신호의 한계값과 추정된 토크의 한계값은 공작기계, 공구, 공작물에 따라 임의로 정할 수 있도록 하였다.

$$AE_avg[t] = \sum_{i=1}^N AE[i] \quad (6)$$

$$R_AE = AE[t]/AE_avg[t] \quad (7)$$

$$Te_avg[t] = \sum_{i=1}^N Te[i] \quad (8)$$

$$R_Te = Te_max[t]/Te_avg[t] \quad (9)$$

3. 실험장치 및 방법

절삭토크 추정 및 공구파손 감시를 위한 실험에 사용된 공작기계는 SIMENS사의 스핀들 모터(1PH6137-4NZ00)가 적용된 현대자동차 HIT-15 CNC 선반으로 모터의 규격과 파라미터는 Tables 1, 2와 같다.

Fig. 2와 Fig. 3은 실험 장치도를 나타내며, 절삭토크 추정을 위해 홀센서(HIOKI사, 9275 Clamp on

Table 1. Specification of induction motor

Phase/ Pole	Power [kw]	Current [A]	Voltage [V]	Frequency [Hz]
3/4	11	41.8	217	26.3

Table 2. Parameters of induction motor

Parameter	Value
Stator resistance(R_s)	0.134 Ω
Rotor resistance(R_r)	0.101 Ω
Stator self-inductance(L_s)	0.0419
Rotor self-inductance(L_r)	0.0423 H
Mutual inductance(L_m)	0.04006 H
Moment of Inertia(J_m)	0.085 $kg \cdot m^2$

Fig. 2. Schematic diagram of tool breakage monitoring.

Fig. 3. The apparatuses for tool breakage monitoring.

AC sensor)와 공구동력계(KISTLER사, 9257B), 전하 증폭기(KISTLER사, 5019A)를, AE신호 검출을 위해 AE센서(AMISTRSA)를 사용하였다.

Fig. 4. Insert slotted by wire EDM on the rake face.

또한 Graphical programming 기법(Ni사, LabView)을 사용하여, 고정자 전류 신호, 절삭력 신호, AE신호는 A/D 변환 보드(Ni사, Ni-DAQ PCI-MIO16E-4 board)를 통해 A/D변환 후, 공구파손 감시 알고리즘에 따라 주축 회전수, 절삭력, 실험에 사용된 절삭 공구는 대한 중석의 TT5100 (CNMG 120408)으로 공구파손 감시를 위한 실험은 건식 절삭법으로 수행하였다. AE 신호를 실시간으로 감시하도록 시스템을 구축하였다. 공구의 파손을 쉽게 일으키기 위하여 Fig. 4와 같이 공구의 경사면을 와이어 방전가공(Wire EDM)으로 슬롯을 가공하였다.

4. 실험결과

공구파손 감시 실험에 앞서 제안한 알고리즘을 적용하여 주축 유도전동기의 전류신호를 이용해 추정된 로터 속도 및 토크(T_e) 값과 공구동력계를 이용해 측정된 토크(T_{ref}) 값이 얼마나 잘 일치 하는지를 알아보았다.

Fig. 5와 Fig. 6는 공작물(SM45C)의 파손을 쉽게 파악하기 위해 0.5 mm, 1 mm, 1.5 mm, 2 mm, 2.5 mm로 0.5 mm단위로 단차를 두고, CNC 선반 주축의 회전수를 $N=850$ rpm, 이송량 $f=0.3$ mm/rev으로 로터 속도와 토크 값을 추정하기 위한 예비 절삭 실험을 한 결과를 나타낸다. 실험결과 로터 속도는 1% 이내의 오차율을 보였고, 토크 값의 경우 초기 절삭 구간에서 추정된 토크 값과 기준 토크 값 사이의 차이는 있지만 평균 3%이내의 오차율을 보였다. 공구 파손 감시를 위한 지표로서 AE센서와 CNC 선반 주축 유도전동기의 전류신호로부터 추정된 토크를 사용하였다. Fig. 7은 실험에 사용된 초경공구의 추천 절삭 조건인 절삭 속도 $v=240$ m/min ($N=720$ rpm), $f=0.3$ mm로 하여 공구 파손 실험을 한 결과를 나타낸다. 실험 결과 절삭 깊이 2.5 mm 진입구간에서 절삭공구의 EDM 슬롯 부위에 파손이 발생했으며, Fig. 7에서 볼 수 있듯이 급격한 토크 감소를 나타

Fig. 5. Estimated rotor velocity under $N=850$ rpm, $f=0.3$ mm/rev.

Fig. 6. Estimated and reference cutting torque under $N=850$ rpm, $f=0.3$ mm/rev.

Fig. 7. Estimated cutting torque under $v=240$ m/min ($N=720$ rpm), $f=0.3$ mm/rev.

Fig. 8. AE signal in turning under $v=240$ m/min ($N=720$ rpm), $f=0.3$ mm/rev.

Fig. 9. Estimated cutting torque and moving max torque under $v=240$ m/min ($N=720$ rpm), $f=0.3$ mm/rev.

Fig. 10. Behavior of AE ratio and cutting torque ratio under $v=240$ m/min ($N=720$ rpm), $f=0.3$ mm/rev.

내었다. Fig. 8의 AE 신호의 경우 절삭 토크와 반대로 절삭공구 파괴 시에 급격한 돌발형 AE 신호를 나타냄을 알 수 있다.

Fig. 9는 절삭 토크비를 구하기 위해 사용된 이동 토크의 최댓값(Te_{max}) 나타낸다. Fig. 10의 그래프는 식(6)과 식(7)에 의해 구해진 AE신호와 AE신호의 이동평균의 비(R_{AE}), 절삭토크의 최댓값과 토크의 이동평균비(R_{Te})를 각각 나타낸다. Fig. 10에서 처음 AE 신호의 값이 비돌발형 신호의 한계 값을 넘으면 절삭 토크 변화의 감시를 시작하고 감시 시간 내의 절삭 토크 또는 AE 신호 값이 비돌발형 신호의 한계 값을 넘으면 공구가 파괴되었음을 판정하도록 하였다.

또한 본 연구에서는 공작기계의 특성 및 절삭조건에 따라 구간 당 데이터 수와 비돌발형 신호의 한계 값을 변경함으로써 공구파손 검출시 민감도와 신뢰도를 조절할 수 있도록 하였다.

본 연구에서는 Fig. 10에 나타낸 것과 같이 공구 파손을 실시간으로 검출하기 위한 비돌발형 신호의 한계 값을 1.25로 선정하였고, 0.02 sec 이내에 공구 파괴를 검출 할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 절삭공정의 자동화를 위해 필수적인 공구 파손 감시 방법으로 기존 연구에서 주로 사용된 하나의 센서로부터 단순 정보를 얻는 방법을 탈피하고 상호보완적인 정보를 이용하기 위해 다중센서를 이용하였다.

또한 기존에 주로 사용되고 있는 공구동력계 대신 유지보수 및 설치가 간단한 홀센서만을 이용하여 CNC 선반 주축 유도전동기의 전류신호로부터 절삭 토크를 추정하고 AE센서를 동시에 이용함으로써 공구 파손 감시를 위한 실제 시스템에 쉽게 적용 할 수 있도록 하였다.

제안한 다중센서를 이용한 공구 파손 감시 알고리즘을 실제 시스템에 적용하여 실험을 한 결과 0.02 sec 이내에 공구 파손을 검출할 수 있었다.

실험결과 전류신호를 이용해 추정된 토크로부터 공구 파손 시 절삭 토크의 급격한 감소를 확인할 수 있었으며, 절삭 과정 중에 추정된 토크는 토크의 최댓값과 최솟값 사이에 약 2.5Nm의 범위를 가지고 있었고 이를 이용하여 공구 파손을 검출 할 수 있었다.

참고문헌

1. Hong. I. J., 2003, "Speed Sensorless Torque Monitoring of Induction Spindle Motor on CNC Lathe using Internet," A master's thesis of The University of Seoul, Republic of Korea.
2. Choi. D., Kwon. W. T., and Chu. C. N., "Real-time Monitoring of Tool Fracture in Turning using Sensor Fusion," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 15, pp. 305-310, 1999.
3. Hong. I. J. and Kwon. W. T., "Speed-sensorless Torque Monitoring on CNC Lathe using Internet," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 21. No. 5, pp.99-105, 2004.
4. Hong. I. J. and Kwon. W. T., "Speed Sensorless Torque Monitoring During Machining on CNC Lathe," *Transactions of the KSME A*, Vol. 28. No. 3, pp. 222-229, 2004.
5. Mannan, M. A. and Brooms, S., "Monitoring and Adaptive Control of Cutting Process by Means of Motor Power and Current Measurement," *Annals of CIRP*, Vol. 38, pp. 347-350, 1989.
6. Oh. Y. T., Kwon. W. T., and Chu. C. N., "Cutting Torque Control in Drilling," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 18. No. 8, pp. 96-106, 2001.
7. Stein, J.L., Colvin, D., Clever, G., and Wang, C. H., "Evaluation of DC Servo Machine Tool Feed Drives as Force Sensors," *ASME J. of Dynamic Systems Measurement and Control*, Vol. 108, pp. 279-288, 1986.
8. 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, 1990.
9. Nicholas P. Rubin, "Evaluation of Sarious Slip Estimation Techniques for an Induction Machine Operating under Field-oriented Control Conditions," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 28, No. 6, pp. 1367-1375, 1992.
10. Toshiyuki Kanmachi and Takahashi, "Sensorless Speed Control of an Induction Motor with no Influence of Secondary Resistance Variation," *IEEE IAS Annual Meeting conference record*, pp. 408-413, 1993.
11. Peter Vas, 1998, "Sensorless vector and direct torque control," Oxford University Press.
12. D. Hoadley, S. Moorthy, and M. Al-Dabbagh, "Steady- state phase-coordinate model of induction machines," *Electric Power Systems Research*, Vol. 57, pp. 189-194, 2001.