

공작기계 주축 유도전동기의 속도 센서리스 토크 감시 (Speed Sensorless Torque Monitoring Of Induction Spindle Motor On Machine Tool)

홍익준(서울시립대원), 권원태(서울시립대 기계정보공학과)

I. J. Hong, W. T. Kwon

University of seoul, Chun-nong-dong 90, Seoul, Korea

Abstract

In this paper, The torque of CNC spindle motor during machining is estimated without speed measuring sensor. The CNC spindle system is divided into two parts, the induction spindle motor part and mechanical part. In mechanical part, the variation of the frictional force due to the increment of the cutting torque and the effect of damping coefficient is investigated. Damping coefficient is found to be a function of spindle speed and not influenced by the weight of the load, while frictional force is a function of both the cutting torque and spindle speed. Experimental formulars are drawn for damping coefficient as a function of spindle speed and frictional force as a function of both cutting torque and spindle speed respectively, to estimate the cutting torque accurately. Graphical programming is used to implement the suggested algorithm, to monitor the torque of an induction motor in real time. Torque of the spindle induction motor is well monitored with 3% error range under various cutting conditions.

1. 서론

절삭상태를 가장 정확하게 나타내어주는 것이 절삭력임은 그 동안의 연구 결과에서 잘 알려져 있다. 절삭력을 측정하기 위하여 공구동력계를 사용하여 직접 측정하는 방법이 있으나 절삭력을 정확하게 측정할 수 있다는 장점이 있지만 비용과 설치상의 문제뿐 아니라 절삭유의 급유, 배선 문

제 등으로 생산현장에서 사용하기에 부적합하다. 따라서, 간접적으로 절삭력을 추정하는 연구들이 수행되었다. 허건수는 CNC선반에서 3상 전류의 rms값과 전체 파워, 그리고 주축 드라이브 모델을 이용하여 절삭력을 추정하였고[1][2] Stein 등은 이송축 DC모터 전류를 이용하여 절삭력을 예측하였다.[3] 또한 최영준은 주축모터 동력을 이용하여 밀링에서의 절삭력을 추정하였고[4] Park 등은 주축 교류 유도모터의 동력을 측정하여 드릴에서의 절삭토크를 추정하였다.[5] 그리고 Mannan 등은 주축모터와 이송축 모터 동력과 전류를 측정하여 절삭공정을 감시하였다.[6] 그러나 전체파워는 전달토크 뿐만 아니라 고정자와 회전자 손실부, 내부인덕턴스의 에너지변화율도 포함하고 있는 단점이 있다. 본 논문에서는 공구동력계를 사용하지 않고 유도전동기의 파라미터와 고정자 전류만으로 절삭력과 속도 정보를 추정하는 새로운 알고리즘을 제안한다. 이 알고리즘은 고정자 전류만을 이용하므로 부가적인 하드웨어를 추가하지 않아도 기존에 설치된 유도전동기 시스템에 바로 적용이 가능하다. 또한 CNC 선반의 주축 드라이브 모델을 이용하여 마찰력 특성을 고려하였다.[2,7]

2. 유도전동기의 센서리스 벡터제어방정식 및 토크방정식 모델링

2.1 전동기 각속도 및 토크추정

고정자 전류에서 회전자 속도와 토크를 추정하기 위해 먼저 자화전류를 식(1)을 이용하여 구

한다.[8]

$$i_{mr} + \left(\frac{L_r}{R_r}\right) \frac{di_{mr}}{dt} = i_{ds} \quad (1)$$

여기서 아래첨자 s 는 고정자측, r 은 회전자측, d 는 d 축, q 는 q 축 성분을 각각 나타내며 p 는 미분연산자(d/dt)이다. 구해진 자화전류에서 슬립각속도를 구하면 다음과 같다.

$$\omega_{sl} = \omega - \omega_r = -\frac{R_r \left(-\frac{L_m}{L_r}\right) i_{qs}}{L_m i_{mr}} = -\frac{i_{qs}}{\left(\frac{L_r}{R_r}\right) i_{mr}} \quad (2)$$

식(2)는 슬립각속도(ω_{sl})를 나타낸다. 여기서 L_m 은 고정자와 회전자의 상호 인덕턴스, ω 는 동기 속도, ω_r 은 전동기 각속도를 나타낸다.

전동기 각속도는 식(3)으로 구한다.

$$\omega_r = \omega - \omega_{sl} = \omega - \frac{i_{qs}}{\left(\frac{L_r}{R_r}\right) i_{mr}} = \omega - \frac{L_m i_{qs}}{\left(\frac{L_r}{R_r}\right) \lambda_r} \quad (3)$$

한편, 유도 전동기에서 발생하는 전기적 토크를 구하는 식은 다음과 같다.[9][10]

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} \lambda_r i_{qs} \quad (4)$$

여기서 P 는 극수이다.

식(1)로부터 자속은 i_{ds} 에 의해 일정하게 제어될 수 있으며, 식(4)로부터 토크는 i_{qs} 에 의해 제어될 수 있음을 알 수 있다.

2.2 마찰토크 변수들의 결정

모니터링 모델은 기계적인 부분과 전기적인 부분으로 구성되며 기계적인 부분의 기본적인 모델식은 다음과 같다.

$$J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r = T_e - T_l \quad (5)$$

여기서 J 는 모터에 의한 총 등가 관성계수 [Nm^2], B 는 등가 감쇠계수 [Nm], T_l 는 모터에 가해지는 총 토크 [Nm]이다.

T_l 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_l = T_{fc0} + \delta T_f + T_c = T_{fc0} + \delta T_{fc} + \delta T_{fv} + T_c \quad (6)$$

여기서 T_{fc0} 는 무부하시 쿨롱 마찰 토크, δT_f 는 절삭부하에 의한 마찰 토크 증가량, T_c 는 절삭 토크, δT_{fc} 는 절삭 부하에 의한 쿨롱 마찰 토크 증가량, δT_{fv} 는 절삭 부하에 의한 점성 마찰 토크 증가량이다. 무부하시 쿨롱 마찰 토크 (T_{fc0})를 구하기 위해 정상상태($d\omega_r/dt=0$)에서 식(5)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = T_{fc0} + B\omega_r \quad (7)$$

여기서 T_e 와 ω_r 은 측정 가능한 값이므로 두 값에 대한 1차 곡선을 그리면 T_{fc0} , B 의 값을 알 수 있다. 여기서 모든 전동기 각속도(ω_r)에 대하여 피팅을 한 결과 1000rpm 전과 후에서 다른 특성을 나타내는 것을 알 수 있었다. 그러므로 1000rpm 이전과 1000rpm 이후로 나누어 피팅하였다. CNC 선반의 주축에 공작물을 고정시켰을 때와 고정시키지 않았을 때의 토크(T_e)의 변화로 인한 T_{fc0} 와 B 의 계수의 변화를 알아보기 위해 fig. 1에서는 주축에 공작물을 고정시키지 않고 6시간동안 30분 간격으로 500rpm에서부터 3000rpm까지 500rpm씩 주축 회전수를 변화시키면서 실험을 행한 토크(T_e)의 결과값을 나타낸다. 이때의 주변온도는 24.5~27.2°C사이에서, 습도는 35~46%RH사이에서 변화하였다. Fig. 2는 주축에 공작물을 고정시키고 12시간동안 30분 간격으로 500rpm에서부터 3000rpm까지 500rpm씩 주축 회전수를 변화시키면서 실험을 행한 토크(T_e)의 결과값을 나타낸다. 실험을 수행할 때의 주변온도는 22~25°C사이에서, 습도는 40~50%RH사이에서 변화하였다.

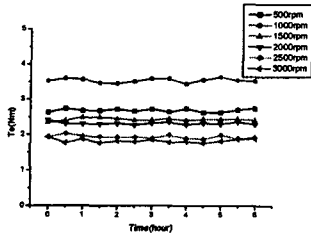


Fig. 1 무부하 상태에서의 각 회전수별 시간에 따른 토크

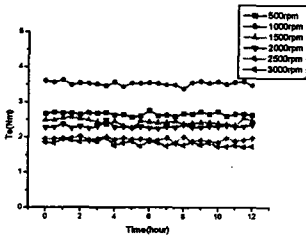


Fig. 2 부하 상태(SM45C, Ø110 x 350mm, 25kg)에서의 각 회전수별 시간에 따른 토크

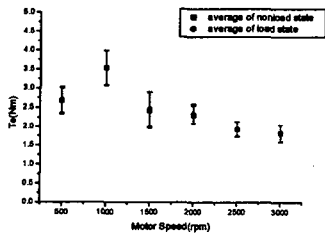


Fig. 3 무부하, 부하 상태에서의 각 회전수별 시간의 따른 토크의 평균값

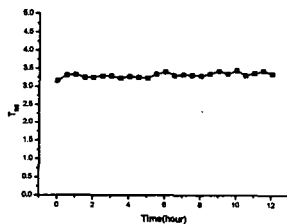


Fig. 4 부하 상태에서의 시간에 따른 T_{fc0} 의 변화량

Fig. 3 에서 보는 바와 같이 무부하, 부하 상태 일 때의 평균값의 차이가 0.1Nm 이하로 차이가 거의 없음을 알 수 있다. Fig. 4 와 Fig. 5 는 1000rpm

이후에서 피팅한 데이터의 시간에 따른 T_{fc0} 와 B 값의 변화량을 나타낸다. 여기서 보는 바와 같이 시간에 따른 값의 변화나 온도나 습도에 따른 변화도 거의 없음을 알 수 있다.

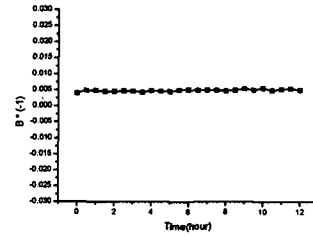


Fig. 5 부하 상태에서의 시간에 따른 B 값 변화량

식(6)에서 절삭 토크(T_c)를 구하기 위해 식(6)를 식(5)에 대입하면 다음과 같다.

$$J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r = T_e - T_{fc0} - \delta T_f - T_c \quad (8)$$

식(8)에서 J, B, T_e, T_{fc0} 의 값을 알고 있으므로 δT_f 만 구하면 T_c 를 구할 수 있다.

절삭부하에 의한 마찰 토크 증가량(δT_f)를 구하기 위해 9 개의 서로 다른 절삭 속도와 6 개의 다른 절삭깊이로 실험을 수행하였다. 공구는 상용 Si_3N_4 계 세라믹 절삭공구를 사용하였으며 공작물은 직경 105mm 의 SM45C 탄소강을 사용하였다. 이 실험을 통하여 절삭 토크(T_c)와 절삭부하에 의한 마찰 토크 증가량(δT_f)의 관계를 Fig.6 와 같이 규명하였다. 이 데이터를 커브 피팅하여 식(9)의 C 와 D 의 계수를 알아낼 수 있다. 그리고 속도가 변하더라도 항상 적용하기 위해 C 와 D 를 주축 속도의 함수로 Fig. 7, Fig.8 와 같이 다시 피팅하였다.

$$\delta T_f = C * T_c + D * T_c^2 \quad (9)$$

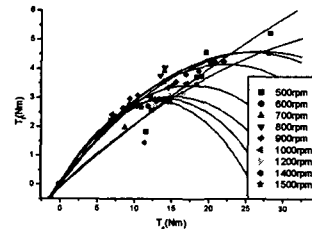


Fig. 6 Nonlinear friction torque increase with cutting

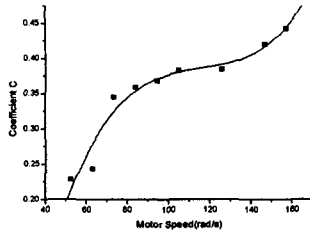


Fig. 7 Curve fitting of coefficient C

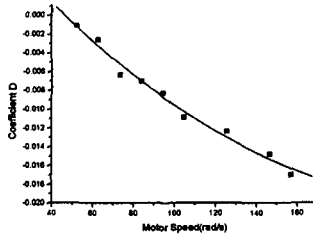


Fig. 8 Curve fitting of coefficient D

커브 피팅 결과를 정리하여 식(9)에 대입하여 최종적인 CNC 선반의 주축 마찰 토크 증가량의 관계식을 나타내면 다음과 같다.

$$\delta T_f = (-0.54269 + 0.02318\omega_r - 1.96254E - 4\omega_r^2 + 5.64549E - 7\omega_r^3) * T_c + (0.01061 - 0.0002\omega_r + 0.53E - 6\omega_r^2) * T_c^2 \quad (10)$$

식(10)에 의해 구해진 비선형 마찰 토크 증가량 값을 이용하여 타임 스텝(i)에서의 절삭 토크를 계산할 수 있다.

$$\hat{T}_c(i) + C * \hat{T}_c(i) + D * \hat{T}_c(i)^2 = \hat{T}_i(i) - T_{fc0} \quad (11)$$

식(11)은 \hat{T}_c 에 대한 2차 방정식으로 나타낼 수 있으므로 \hat{T}_c 에 대해 해석적인 해를 얻을 수가 있다.

3. 실험 및 결과

3.1 실험장치

실험에 사용된 공작기계는 현대자동차 HIT-15 CNC 선반이며 스피들 모터는 SIEMENS 사의 1PH6137-4N200이며 규격은 다음과 같다. 공구 동력계는 스위스 키슬러사의 9257B 모델이며 전하 증폭기는 키슬러사의 5019A 모델을 사

Table 1 Specification of induction motor

Phase/Pole	Rated Power	Rated Current
3phase/4pole	11[kw]	41.8[A]
Rated Speed	Rated Voltage	Rated Frequency
750[1/min]	217[V]	26.3[Hz]

Table 2 Parameter of induction motor

Parameter	실제치
Stator resistance (R_s)	0.134?
Rotor resistance (R_r)	0.101?
Stator self-inductance (L_s)	0.0419H
Rotor self-inductance (L_r)	0.0423H
Mutual inductance (L_m)	0.04006H
Moment of Inertia (J_m)	0.085 kg · m ²

용하였다. U, V, W의 3상 전류는 HIOKI사의 9275 CLAMP ON AC SENSOR를 사용하여 i_{as}, i_{bs}, i_{cs} 를 측정하였다. 고정자 전류신호와 전하 증폭기에서 나오는 절삭력 신호는 A/D 변환보드인 NI-DAQ PCI-MIO16E-4 board를 통해 A/D 변환한 후 586PC에 저장하였고, 객체 지향적 프로그램 작성을 위해 토크 측정 알고리즘에 따라 Graphical programming기법인 LabVIEW 6.0i[11][12]를 사용하여 토크 모니터링 시스템을 구축하였다.

3.2 토크추정 알고리즘

기존의 벡터제어 해석의 의한 알고리즘은 벡터제어에 의한 목표치의 변화에 의하여 모터토크의 변화를 감시하여 왔으나 목표치와 실제치의 거동에 대한 일치성을 보임으로써 부하에 의한 전체 토크의 변화를 홀 센서를 이용하여 간단히 나타낼 수 있을 뿐만 아니라, 전체시스템이 전류에 대한 식으로 나타낼 수 있는 근거를 제시한다. 또한 측정당시 온도나 부하상태에 따라 변하는 회전자 저항 등의 비선형적인 요소를 고려하지 않았다. 비선형적인 모터요소에 의하여 발생하는 전류신호 진동에 의한 심한 토크 진동은 소프트웨어를 이용하여 전류신호를 재구성 함으로써 해결하였다.[9]

3.3 실험결과

실험은 각 채널마다 초당 100개의 데이터를 저장하였으며 이때 토크의 진동을 줄이기 위해 먼저 20개 데이터의 평균을 구하고 첫번째 데이터는 제외하고 21번째 데이터를 포함하여 평균을 구하는 moving average 기법을 이용하였다.

실험은 주축의 회전수가 500rpm, 700rpm, 900rpm, 1000rpm, 1500rpm으로 구동 시 절삭을 수행한 결과를 나타낸다. 실험에 사용된 공구는 상용 Si₃N₄ 계 세라믹 절삭공구이며 Feedrate는 0.2 mm/rev 이다.

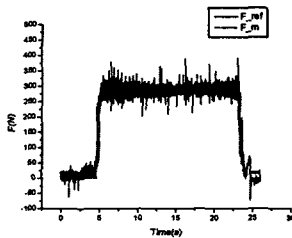


Fig. 9 Estimated and reference cutting force (Material: Gray cast iron, Spindle speed:500rpm, Depth of cut:1mm)

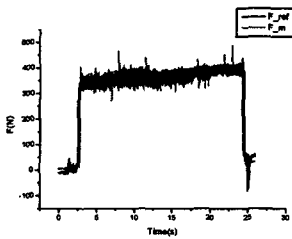


Fig. 10 Estimated and reference cutting force (Material:SM45C steel, Spindle speed:700rpm, Depth of cut:2mm)

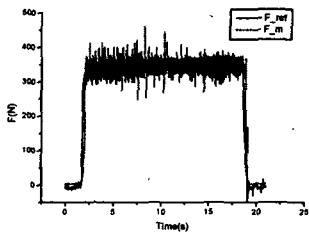


Fig. 11 Estimated and reference cutting force (Material:SM45C steel, Spindle speed:1000rpm, Depth of cut:2mm)

Fig. 9에서 절삭력은 공구동력계로 측정된 절삭력과 추정된 절삭력을 비교해 2.6%의 오차율을 나타냈고, Fig. 10에서는 오차율이 3.2%, Fig. 11에서는 2.84%의 오차율을 보였다. Time delay는 0.3sec 정도로 양호한 결과를 보였다. Fig. 9에서와 같이 절삭전의 공구동력계의 절삭력 신호와 절삭후의 절삭력 신호의 값이 다른점은 키티슬러사 공구동력계의 특징인 드래프트현상 때문이다.

실험한 결과 공작물의 재료와 절삭조건에 조합에 무관하게 절삭력을 잘 추종함을 알 수 있다.

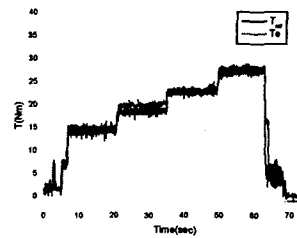


Fig. 12 Estimated and reference cutting torque (Material:SM45C steel, Spindle speed:500rpm, Depth of cut:0.5mm,1mm,1.5mm,2mm)

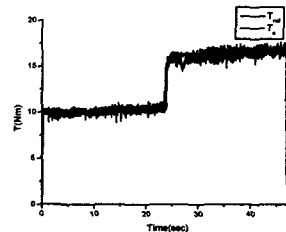


Fig. 13 Estimated and reference cutting torque (Material:SM45C steel, Spindle speed:900rpm, Depth of cut:0.5mm,1mm,)

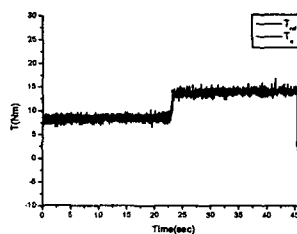


Fig. 14 Estimated and reference cutting torque (Material:SM45C steel, Spindle speed:1500rpm, Depth of cut:0.5mm,1mm,)

Fig. 12와 Fig.13, Fig.14는 공작물에 0.5mm씩의 단을 주어 500rpm과 1500rpm에서 실험을 한 결과를 나타낸다. Fig.12는 마찰 토크를 구하기 위하여 실험한 주축 회전수가 아닌 900rpm으로 실험한 결과를 나타낸다. 각 단마다 오차율은 조금씩 차이를 보이지만 평균적으로 3%이내의 오차율을 보였다. Time delay는 앞의 실험결과와 마찬가지로 0.3sec정도로 나타났다.

4. 결론

1) 추정된 유도전동기에서 발생하는 전기적 토크와 유도전동기 각속도 신호를 이용하여 부부하시 쿠울롱 마찰 토크(T_{fc0})와 등가감쇠계수(B)를 결정하였다.

2) 공구 동력계로 측정된 절삭력 신호와 주축 유도전동기의 기계적 부분의 모니터링 모델식을 이용하여 비선형 마찰 토크(δT_f) 변수를 결정하였다.

3) 본 알고리즘을 실제 시스템에 적용하여 실험을 한 결과 정상상태에서의 오차는 평균 3%범위 안에 있으므로 추정값에 대한 신뢰도가 우수한 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] K.Lee, J.Jung, J.Kim, K.Huh, J.Kim, "Development of a Cutting Force Monitoring System for a CNC Lathe," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Spring Conference, pp.440-444, 1998.
- [2] K.Huh, K.Lee, J.Kim, "Development of a Cutting Force Monitoring System for a CNC Lathe," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 16, No.1, 1999
- [3] Stein, J. L., Colvin, D.,Clever, G., 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.
- [4] Y. J. Choi, "A Study Cutting Force Estimation using Spindle Motor Power Measurement," Seoul National University, Department Of Mechanical Design, M. D. Thesis,
- [5] Park, J. J., Luca, S., "Cutting Torque Estimation using Spindle Power Measurement," Transaction of NAMRI/SME, Vol. 24, pp.85-90, 1994.
- [6] Mannan, M. A., Broms, S., et al., "Monitoring and Adaptive Control of Cutting Process by means of Motor Power and Current Measurement," Annals of CIRP, Vol. 38, pp.347-350, 1989.
- [7] 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.
- [8] J. W. Park, W. T. Kwon, "Speed Sensorless Torque Monitoring of Induction Spindle Motor using Graphic Programming," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, accepted for publication
- [9] I. H. Lee, W. T. Kwon, "The Torque Monitoring System using Current and Speed Mesurment," Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, Spring Conference, pp. 125-131, 2001
- [10] I. H. Lee, W. T. Kwon, "Development Of Torque Monitoring System Of Induction Spindle Motor Using G-program LabVIEW," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 18, No. 10, pp. 184-193, 2001
- [11] National Instrument, "Data Acquisition Basics Manual, Function Reference", 2000.
- [12] D. Y. Gwak, "LabVIEW Control And Monitoring Solution In Basis Of Computer," Ohm Company, 2002