

인터넷을 이용한 CNC 선반의 속도 센서리스 토크감시

홍익준*, 권원태#

Speed-Sensorless Torque Monitoring on CNC Lathe using Internet

Ik Jun Hong* and Won Tae Kwon#

ABSTRACT

Internet provides the useful method to monitor the current states of the machine tool no matter where a personnel monitors it. In this paper, a monitoring method of the torque of the machine tool's spindle induction motor using internet is suggested. To estimate the torque accurately, spindle driving system of an CNC lathe is divide into two parts, induction motor part and mechanical part attached to the induction motor spindle. Magnetizing current is calculated from the measured 3 phase currents without speed sensor used to estimate the torque generated by an induction motor. In mechanical part of the system, some of the torque is used to overcome friction and remaining torque is used to overcome cutting force. An equation to estimate friction torque is drawn as a function of cutting torque and rotation speed. Graphical programming is used to implement the suggested algorithm, to monitor the torque of an induction motor in real time and to make the estimated torque monitored on client computers. Torque of the spindle induction motor is well monitored on the client computers in about 3% error range under various cutting conditions.

Key Words : CNC lathe(CNC 선반), Internet(인터넷), Condition monitoring(상태감시), Spindle motor current (주축전류), Cutting torque(절삭토크)

기호설명

R_s, R_r = 고정자와 회전자의 상저항 [Ω]
 L_s, L_r = 고정자와 회전자의 인덕턴스 [H]
 L_m = 고정자와 회전자의 상호 인덕턴스 [H]
 i_{mr} = 자화전류 [A]
 $\omega, \omega_r, \omega_{sl}$ = 유도전동기의 동기각속도, 회전자
 각속도, 슬립각속도
 λ_s, λ_r = 고정자와 회전자의 자속
 T_e = 유도전동기의 전기적 토크 [Nm]
 J = 전동기에 의한 총 등가 관성계수 [Nm²]

B = 등가감쇠계수 [Nm]
 T_t = 전동기에 가해지는 총토크 [Nm]
 T_{fc0} = 무부하 시 쿨롱 마찰토크
 δT_f = 절삭부하에 의한 마찰토크 증가량
 T_c = 절삭 토크

1. 서론

절삭력은 절삭 과정 중에 이상 현상이나 오 동작을 예측할 수 있는 가장 정확한 신호이다. 절삭력을 공구동력계를 이용하여 직접 측정하는

접수일: 2002년 12월 3일; 게재승인일: 2004년 2월 20일
 * 서울시립대학교대학원 기계정보공학과
 # 교신저자: 서울시립대학교 기계정보공학과
 E-mail: kwon@uos.ac.kr, Tel: (02) 2210-2403

방식은 가장 정확하나 비용과 설치 등의 문제로 생산 현장에서 사용하기에는 부적합하므로 간접적으로 절삭력을 추정하는 연구들이 활발히 진행되고 있다. 허건수는 유도전동기에 인가되는 전체 파워를 이용하여 토크를 추정하였으며 추정된 토크로 절삭력을 예측하여 이상진단을 할 수 있는 근거를 제시하였다.^{1,2}

Stein 과 Wang 은 밀링 공정 시 정상 상태에서 AC 유도 전동기의 회전자에 인가되는 동력은 절삭 토크와 선형적이고, 정적 민감도가 회전 속도에 비례하며, 스피들 시스템은 선형 2 차 센서시스템으로 모델링 할 수 있음을 보였다. 또한 드릴링 시 전동기 파워를 이용하여 절삭 토크를 추정할 수 있음을 보였다.³

파워로 토크를 구하는 방법은 그 안에 전달토크뿐 아니라 고정자와 회전자의 손실 및 내부 인덕턴스에 의한 에너지 손실도 포함하고 있는 단점이 있다.

Park 과 Luca 는 3 상의 교류 전류 중 정류기와 저주파 필터를 통과한 1 상의 전류만을 측정하여 드릴 공구의 파손을 검출할 수 있음을 보였다.⁴ 그러나 이 방법으로는 드릴 공구의 큰 파손만을 검출할 수 있다.

최영준은 주축 1 회전 당 평균 동력으로 평균 절삭력을 추정했지만, 측정해야 할 변수가 너무 많다는 단점이 있다.⁵

본 논문에서는 선반의 주축시스템을 모터부와 기계부로 나누어 모델링 하였다. 모터부 모델을 이용하여 속도센서 없이 전류신호만으로 추정하였고, 기계부 모델링으로 마찰력을 제외한 절삭력만을 분리하여 추정하였다. 기계부의 마찰력을 분리함으로써 절삭토크를 좀 더 정확히 추정할 수 있었다.

또한 G-program 기법인 LabVIEW 를 이용하여 네트워크 기반의 제어와 계측이 가능하도록 하였다.

2. 유도전동기 각속도 및 토크 추정

2.1 센서리스 토크추정

동기 회전 좌표계에서 3 상 유도전동기의 d-q 전압 방정식⁶ 에서 회전자 자속식은 다음과 같이 표시된다.⁷

$$\lambda_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} = L_m i_{mr} \quad (1)$$

$$\lambda_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (2)$$

유도전동기에서는 관측의 기준축인 Φ 축의 회전자 자속을 축에 일치시켜 정렬하면 q 축 회전자 자속(λ_{qr})이 0 이 되고 d 축 회전자 자속(λ_{dr})은 일정한 값을 가진다. 그리고 전압방정식을 이용하여 d 축 전류를 계산하여 자화전류와 슬립각속도를 표현하면 다음과 같다.⁸

$$i_{mr} + \left(\frac{L_r}{R_r}\right) \frac{di_{mr}}{dt} = i_{ds} \quad (3)$$

$$\omega_{sl} = \omega - \omega_r = -\frac{R_r \left(-\frac{L_m}{L_r}\right) i_{qs}}{L_m i_{mr}} = \frac{i_{qs}}{\left(\frac{L_r}{R_r}\right) i_{mr}} \quad (4)$$

동기속도 ω 는 고정자 각 권선에 인입되는 a, b, c 상 전류의 주파수와 같으므로, 슬립각속도의 추정치 ω_{sl} 를 계산하면 전동기 속도 ω_r 를 추정할 수 있다. 따라서 전동기 속도 추정식은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\omega_r = \omega - \omega_{sl} = \omega_e - \frac{i_{qs}}{\left(\frac{L_r}{R_r}\right) i_{mr}} = \omega_e - \frac{L_m i_{qs}}{\left(\frac{L_r}{R_r}\right) \lambda_r} \quad (5)$$

한편, 유도 전동기에 발생하는 전기적 토크를 구하는 식은 다음과 같다.^{8,9,10}

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} \lambda_r i_{qs} \quad (6)$$

여기서 P 는 극 수이다.

식(3)에서 자속은 i_{ds} 에 의해 일정하게 제어될 수 있으며, 식(6)에서 토크는 i_{qs} 에 의해 제어될 수 있음을 알 수 있다.

2.2 마찰 토크 변수들의 결정

식 (7)로 주어지는 모니터링 모델 중에 기계부에서 발생하는 토크는 T_t 에 내재되어 있으므로 이에 대한 분석이 실험적으로 행하여졌다.

$$J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r = T_e - T_i \quad (7)$$

우선 T_i 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.²

$$T_i = T_{fc0} + \delta T_f + T_c = T_{fc0} + \delta T_{fc} + \delta T_{fv} + T_c \quad (8)$$

무부하 시 쿠울롱 마찰 토크(T_{fc0})를 구하기 위해 정상상태($d\omega_r/dt=0$)에서 식(7)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = T_{fc0} + B\omega_r \quad (9)$$

여기서 T_e 와 ω_r 은 측정 가능한 값이므로 두 값에 대한 1차 곡선을 그리면 T_{fc0} , B 의 값을 알 수 있다.

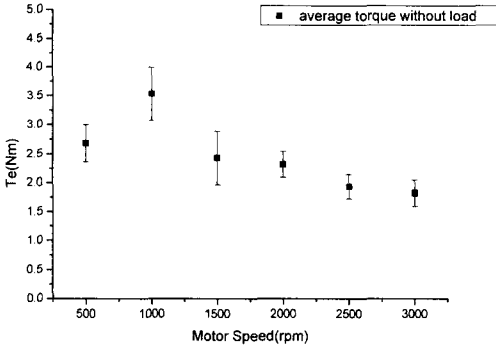


Fig.1 Average torque without load according to motor speed variation

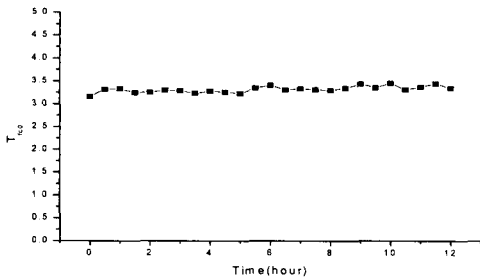


Fig. 2 Coulum friction variation according to time (above 100rpm)

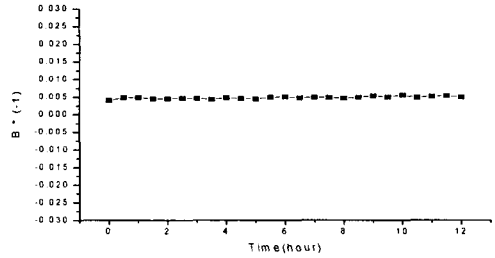


Fig. 3 Damping coefficient variation according to time (above 1000rpm)

Fig.1 은 주축 회전수 당 토크의 평균값을 나타내며 1000rpm 을 기준으로 전과 후로 나누어 ω_r 에 대하여 1 차로 피팅하면 기울기로 B , 절편으로 T_{fc0} 값을 각각 구할 수 있다. 온도나 습도 등의 영향을 알아보기 위해 12 시간동안 30 분 간격으로 500rpm 에서 3000rpm 까지 500rpm 씩 주축 회전수를 변화시키면서 유도전동기의 전기적 토크와 전동기 각속도를 측정했다.

Fig.2 와 3 은 1000rpm 이후에서 T_{fc0} 와 B 값을 시간에 따른 변화량으로 나타내었다. 여기서 보는 바와 같이 시간에 따른 값의 변화나 온도나 습도에 따른 변화도 거의 없음을 알 수 있다.

절삭부하 증가에 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 관계가 Fig.4 에 주어졌다. 이 데이터를 커브 피팅하여 식(10)의 C 와 D 의 계수를 알 수 있다. C 와 D 는 절삭속도의 함수이므로 절삭속도에 대하여 피팅하여 각각 Fig. 5 와 6 으로 나타냈다.

$$\delta T_f = C * T_c + D * T_c^2 \quad (10)$$

커브 피팅 결과를 정리하여 식(10)에 대입하여 최종적인 CNC 선반의 주축 마찰 토크 증가량의 관계식을 나타내면 식(11)과 같다. 결과적으로 식(7)은 절삭 토크에 대한 2 차 함수로 표현되므로 절삭 토크에 대한 해석적인 해를 얻을 수 있다

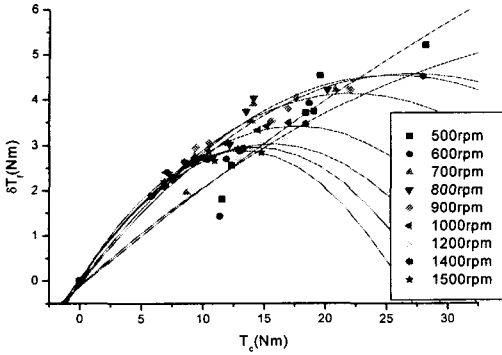


Fig. 4 Nonlinear friction torque during machining

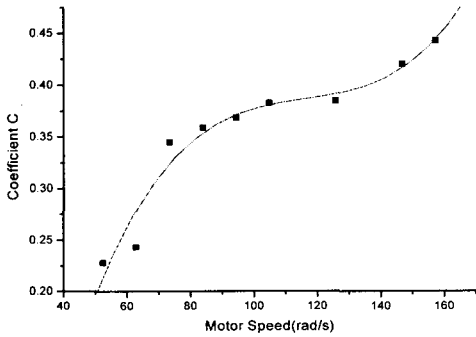


Fig. 5 Curve fitting of coefficient C

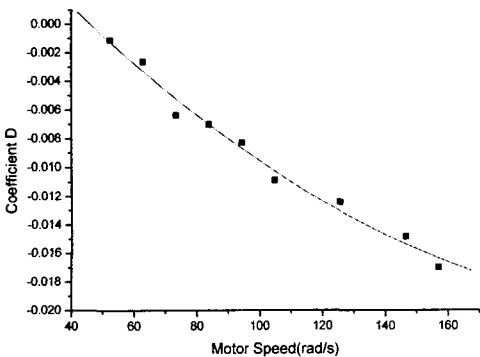


Fig. 6 Curve fitting of coefficient D

$$\delta T_f = (-0.54269 + 0.02318\omega_r - 1.96254 \cdot 10^{-4}\omega_r^2 + 5.64549 \cdot 10^{-7}\omega_r^3) * T_c + (0.01061 - 0.00026\omega_r + 0.53 \cdot 10^{-6}\omega_r^2) * T_c^2$$

(11)

3. 실험 및 결과

3.1 실험장치

실험에 사용된 공작기계는 현대자동차 HiT-15 CNC 선반이며 스핀들 모터는 SIEMENS 사의 1PH6137-4NZ00 이며 규격은 Table1 과 2 에 주어졌다. 공구 동력계는 스위스 키슬러사의 9257B 모델이며 전하 증폭기는 키슬러사의 5019A 모델을 사용하였다. U, V, W 의 3 상 전류는 HIOKI 사의 9275 CLAMP ON AC SENSOR 를 사용하여 측정하였다. 고정자 전류신호와 전하 증폭기에서 나오는 절삭력 신호는 A/D 변환보드인 NI-DAQ PCI-MIO16E-4 board 를 통해 A/D 변환한 후 586PC 에 저장하였고, 객체 지향적 프로그램 작성을 위해 Graphical programming 기법인 LabVIEW 6.0i^{11,12} 를 사용하여 토크 모니터링 시스템을 구축하였다. 인터넷을 이용한 CNC 선반의 절삭과정 감시가 Fig.7 에 보여졌다. 작성한 프로그램을 월드 와이드 웹(World Wide Web)상에 올리고 멀리 떨어져 있는 기기를 internet 을 이용하여 실시간 모니터링 및 제어를 하기 위하여 LabVIEW 에서 제공하는 웹 퍼블리싱 툴(Web Publishing Tool)을 사용하였다. Fig. 8 은 결과적으로 클라이언트 컴퓨터에서 관측된 속도와 토크이다.

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	Factory setting
Stator resistance (R_s)	0.134Ω
Rotor resistance (R_r)	0.101Ω
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

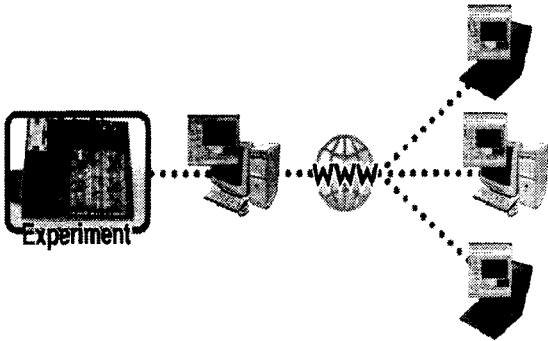


Fig.7 Torque monitoring of CNC lathe using internet

3.2 실험 결과

실험은 주축의 회전수가 500rpm, 900rpm, 1000rpm, 1100rpm, 1500rpm 으로 구동 시 절삭 실험 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 공구는

상용 Si₃N₄ 계 세라믹 절삭공구이며 이송속도는 0.2 mm/rev. 이다. 데이터 처리는 각 채널마다 초당 100 개의 데이터를 저장하였으며 이때 토크의 진동을 줄이기 위해 먼저 20 개 데이터의 평균을 구하고 첫번째 데이터는 제외하고 21 번째 데이터를 포함하여 평균을 구하는 이동평균기법을 이용하였다.공구동력계로 측정된 절삭력과 추정된 절삭력을 비교한 결과가 Fig. 9 에 보여졌는데 오차율은 2.6%였다. Fig. 10 은 공작물에 0.5mm 씩의 단(step)을 주어 실험한 결과이다. 각 단마다 오차율은 조금씩 차이를 보이지만 평균 3%정도로 나타났다.

시간지연(time delay)는 모든 실험 결과에서 0.3 초 정도였다. Fig. 11 에서 오차율은 2.84%였다. Fig. 12-14 에서 공작물에 0.5mm 의 단을 주고 절삭속도를 바꾸면서 실험을 한 결과를 나타냈다. Fig. 12 는 등가감쇠계수를 구하기 위해 실험한

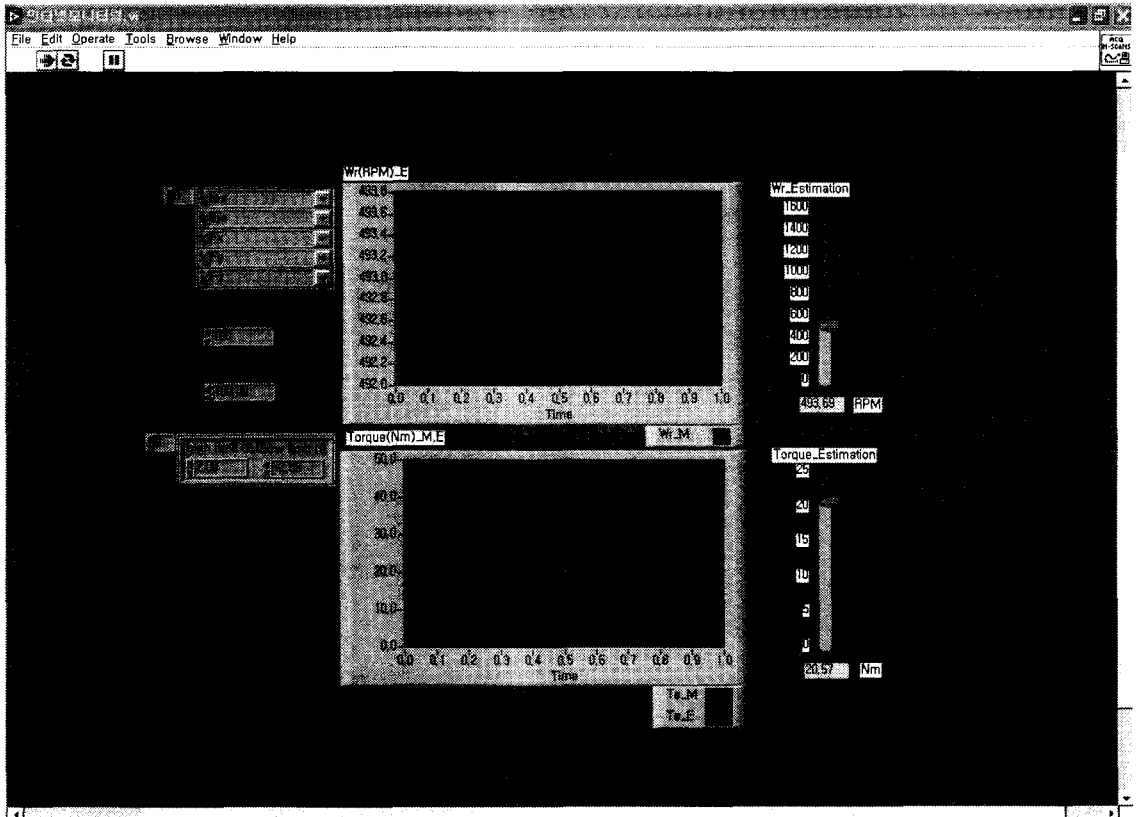


Fig. 8 Torque and velocity monitored at client computer through internet

주축회전수가 아닌 900rpm 으로 실험한 결과이며, Fig.13 은 절삭 부하에 의한 마찰 토크의 증가량을 구하기 위해 실험한 주축 회전수가 아닌 1100rpm 으로 실험한 결과이다. 각 단마다 오차율은 조금씩 차이를 보이지만 평균적으로 3%이내의 오차율을 보였다.

Fig.14 는 비교적 고속 회전인 1500rpm 에서 실험한 결과이다. 오차율은 평균 3%로 양호한 결과를 보였다.

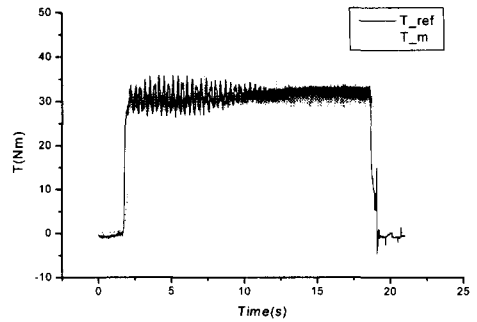


Fig. 11 Estimated and reference cutting torque (Material: SM45C, Spindle speed: 1000rpm, Depth of cut: 2mm)

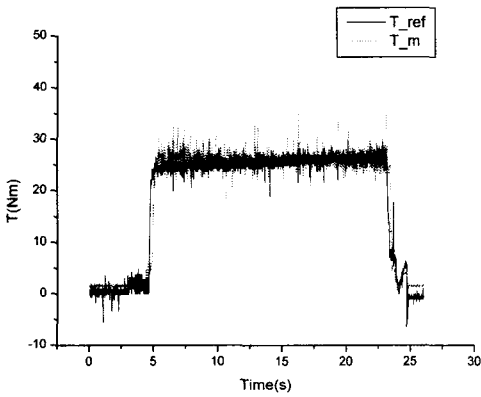


Fig. 9 Estimated and reference cutting torque (Material: Gray cast iron, Spindle speed: 500rpm, Depth of cut: 1mm)

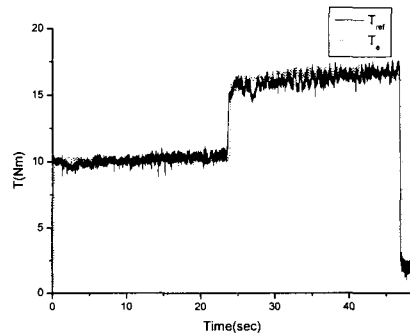


Fig. 12 Estimated and reference cutting torque (Material: SM45C, Spindle speed: 900rpm, Depth of cut: 0.5mm, 1mm,)

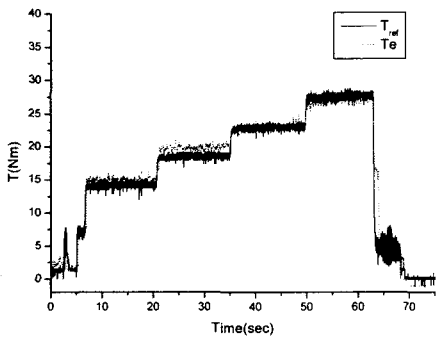


Fig. 10 Estimated and reference cutting torque (Material: SM45C, Spindle speed: 500rpm, Depth of cut: 0.5mm, 1mm, 1.5mm, 2mm)

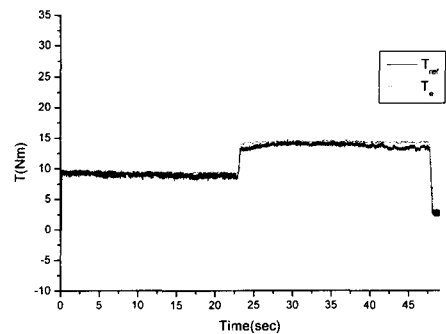


Fig. 13 Estimated and reference cutting torque (Material: SM45C, Spindle speed: 1100rpm, Depth of cut: 0.5mm, 1mm)

참고문헌

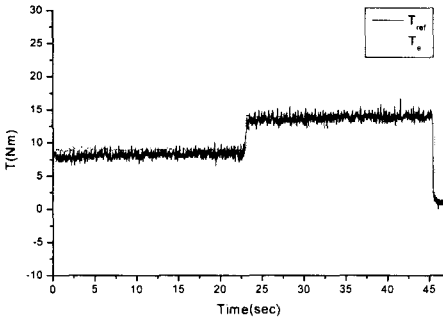


Fig. 14 Estimated and reference cutting torque (Material: SM45C, Spindle speed: 1500rpm, Depth of cut: 0.5mm, 1mm)

4. 결론

- 1) CNC 주축시스템을 모터부와 기계부로 나누어 해석함으로써 전류를 이용한 토크 추정정밀도를 3%내로 높였다.
- 2) 무 부하 시 속도에 관한 토크의 값의 변화를 1000rpm 을 전후로 각각 2 개의 1 차 방정식으로 curve fitting 하여 쿨롱 마찰계수(T_{f0})와 등가 감쇠계수(B)를 구하였다.
- 3) 벡터 제어되는 유도전동기의 고정자 전류신호만을 측정하여 전기적 토크와 각속도를 추정하였다.
- 4) 모터부는 자화전류에 대한 1 계 미분방정식의 해를 구함으로써 토크와 각속도를 추정하였다.
- 5) 기계부 해석을 위해 쿨롱 마찰력과 점성마찰력을 구하고, 정상상태에서 전체 모델식을 절삭토크에 대한 2 차식으로 만든 후 해를 구하여 절삭토크를 추정하였다.
- 6) 절삭토크와 절삭속도를 인터넷에서 감시할 수 있는 시스템을 개발하였다.

1. Lee, K., Jung, J., Kim, J., Huh, K. and Kim, J., "Development of a Cutting Force Monitoring System for a CNC Lathe," Proc. of kspe, pp.440-444, 1998.
2. Huh, K., Lee, K. and Kim, J., "Development of a Cutting Force Monitoring System for a CNC Lathe," J. of KSPE, Vol. 16, No.1, 1999.
3. 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 Dyn. Sys. Mea. and Cont., Vol. 108, pp.279-288, 1986.
4. Park, J. J. and Luca, S., "Cutting Torque Estimation using Spindle Power Measurement," Trans. of NAMRI/SME, Vol. 24, pp.85-90, 1994.
5. Choi, Y. J., "A Study Cutting Force Estimation using Spindle Motor Power Measurement," Seoul Nat. Univ., Dept. of Mech. Design, M. D. Thesis,
6. Krause, P. C., "Analysis of Electric Machinery," McGraw-Hill, 1986.
7. Vas, P., "Sensorless vector and direct torque control," Oxford University Press, 1998.
8. Park, J. W. and Kwon, W. T., "Speed Sensorless Torque Monitoring of Induction Spindle Motor using Graphic Programming," J. of KSPE, Vol. 19, No. 10, pp.107-113, 2002.
9. Lee, I. H. and Kwon, W. T., "Torque Monitoring System using Current and Speed Measurement," Proc. of kspe, pp. 125-131, 2001.
10. Lee, I. H. and Kwon, W. T., "Development Of Torque Monitoring System of Induction Spindle Motor Using G-program LabVIEW," J. of KSPE, Vol. 18, No. 10, pp. 184-193, 2001.
11. National Instrument, "Data Acquisition Basics Manual, Function Reference," 2000.
12. Gwak, D. W., "LabVIEW Control and Monitoring Solution in Basis of Computer," Ohm Company, 2002.