

CNC 선반가공 중 속도 센서리스 토크 감시

홍익준* · 권원태†

(2002년 12월 16일 접수, 2004년 1월 5일 심사완료)

Speed Sensorless Torque Monitoring During Machining on CNC Lathe

Ik jun Hong and Won Tae Kwon

Key Words : CNC Lathe(CNC 선반), Torque Monitoring(토크 감시), Coulumb Friction(쿨롱 마찰), Increment of Frictional Force(마찰 토크 증가량)

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 equations are drawn for damping coefficient and Coulumb friction as a function of spindle speed. Incremental frictional torque is also obtained as a function of both cutting torque and spindle speed. 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 estimated well in about average 3% error range under various cutting conditions.

기호설명

R_s, R_r : 고정자와 회전자의 상 저항 [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 [Nm^2]
 B : 등가감쇠계수 [Nm]
 T_f : 전동기에 가해지는 총토크 [Nm]
 T_l : 전동기에 가해지는 총토크 [Nm]

T_{f0} : 무부하시 쿨롱 마찰토크
 δT_f : 절삭부하에 의한 마찰토크 증가량
 T_c : 절삭 토크

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 절삭유, 급유, 배선 문제 등으로 생산현장에서 사용하기에 부적합하다. 따라서, 간접적으로 절삭력을 추정하는 연구들이 수행되었다. 허건수는 CNC 선반에서 3상 전류의 rms 값과 전체 파워, 그리고 주축 드라이브 모델을 이용하여 절삭력을 추정하였고,^(1,2) Stein 등은 이송축 DC 모터 전류를 이용하여 절삭력을 예측하였다.⁽³⁾ 또한 최영준은 주축모터 동력을 이용하여 밀

† 책임저자, 회원, 서울시립대학교 기계정보공학과
E-mail : kwon@uos.ac.kr
TEL : (02)2210-2403 FAX : (02) 2248-5110

* 서울시립대학교대학원 기계정보공학과

링에서의 절삭력을 추정하였고,⁽⁴⁾ Park 등은 주축 교류 유도모터의 동력을 측정하여 드릴에서의 절삭토크를 추정하였다.⁽⁵⁾ 그리고 Mannan 등은 주축 모터와 이송축 모터 동력과 전류를 측정하여 절삭공정을 감시하였다.⁽⁶⁾ 그러나 전체파워는 전달토크뿐만 아니라 고정자와 회전자의 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. 유도전동기의 센서리스 벡터제어 방정식 및 토크방정식 모델링

2.1 전동기 각속도 및 토크 추정

고정자 전류에서 회전자 속도와 토크를 추정하기 위해 먼저 자화전류를 식 (1)을 이용하여 구한다.⁽⁷⁾

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

여기서 아래첨자 s 는 고정자측, r 은 회전자측 성분을 각각 나타내며 p 는 미분연산자 $\frac{d}{dt}$ 이다. 구해진 자화전류에서 슬립각속도를 구하면 다음과 같다.⁽⁷⁾

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

식 (2)는 슬립각속도(ω_{sl})를 나타낸다. 여기서 L_m 은 고정자와 회전자의 상호 인덕턴스, ω 는 동기속도, 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.^(8,9)

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

여기서 P 는 극 수이다.

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

유도전동기에서 등가함수를 이용하여 모니터링할 모델을 표시하면 다음과 같이 각속도에 대한 1차 미분방정식으로 나타난다.

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

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.⁽¹⁾

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

여기서 T_{fc0} 는 무부하 시 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.

2.2.1 쿨롱 마찰토크와 감쇠계수의 결정

무부하시 쿨롱 마찰 토크(T_{fc0})를 구하기 위해 정상상태($d\omega_r/dt=0$)에서 식 (5)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

이 식이 타당하다면 T_e 와 ω_r 은 측정 가능한 값이므로 ω_r 에 대한 1차 방정식을 구하면 T_{fc0} , B 의 값을 알 수 있다. CNC 선반의 작동시간이 늘어남에 따른 T_e 값의 변화를 알아보기 위하여 CNC 선반에서 공작물 없이 6 시간동안 30 분 간격으로 500rpm 에서부터 3000rpm 까지 500rpm 씩 주축 회

전 수를 변화시키면서 토크를 측정한 결과가 Fig. 1 에 주어졌다. 이때의 주변온도는 24.5~27.2°C 사이에서, 습도는 35~46%RH 사이에서 변화였다. Fig. 2 는 주축에 25kg 짜리 공작물을 고정시키고 12 시간동안 30 분 간격으로 500rpm 에서부터 3000rpm 까지 500rpm 씩 주축 회전 수를 변화시키면서 실험을 행한 결과이다. 이 때의 주변온도는 22~25°C 사이에서, 습도는 40~50%RH 사이에서 변화였다. Fig. 1 과 2 에서 볼 수 있듯이, 시간에 따른 T_e 의 변동은 공작물의 유무에 무관하게 무시할 만 하였다. 같은 회전속도에서 공작물이 있을 때나 없을 때 T_e 의 평균값의 차이도 0.1Nm 이하로 무시할 만 하였다. 토크 변화 형태가 Fig. 3 과 같이 1000rpm 전후에서 다르게 나타나므로 이를 기준으로 양쪽으로 나눈 후 각각 1 차로 커브피팅 하였다. Fig. 4 와 5 는 1000rpm 전과 후에서 피팅한 결과이다. 이 식에서 기울기는 B , 절편은 T_{f0} 가 된다.

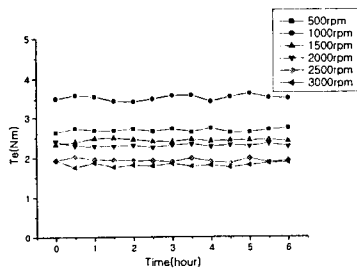


Fig. 1 Torque variation of a CNC lathe spindle motor without load

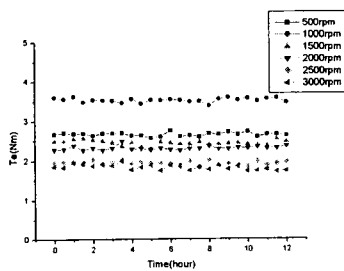


Fig. 2 Torque variation of a CNC lathe spindle motor with load ($\phi 110 \times 350 \text{mm}$, 25kg)

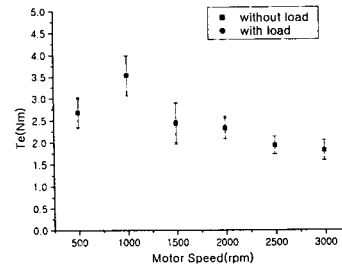


Fig. 3 Torque variation of a CNC lathe spindle motor as a function of motor speed

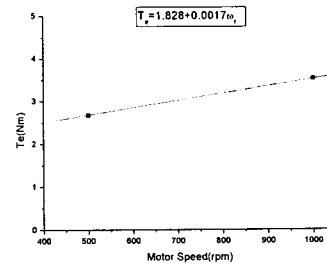


Fig. 4 Torque variation of a CNC lathe spindle motor (below 1000rpm)

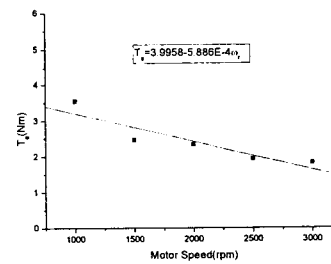


Fig. 5 Torque variation of a CNC lathe spindle motor (above 1000rpm)

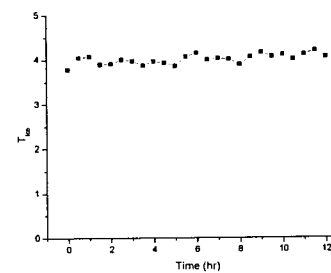


Fig. 6 Coulumb friction torque variation as a function of time (above 1000rpm)

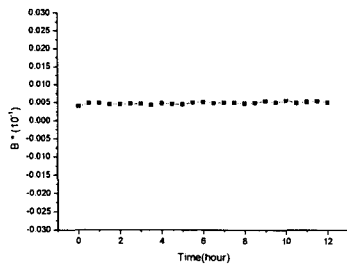


Fig. 7 Damping coefficient variation as a function of time (above 1000rpm)

Fig. 6 과 7 은 Fig. 4 와 5 에서 구한 T_{fc0} 와 B 값의 시간에 따른 변화량으로 시간에 따라 거의 변화가 없음을 증명되었다. 결과적으로 쿨롱 마찰 계수와 동가감쇠계수는 시간, 온도, 습도 및 공작물의 유무에 관계없이 일정한 값으로 결정할 수 있다.

2.2.2 마찰토크 증가량의 결정

식 (6)에서 절삭 토크(T_c)를 구하기 위해 식 (6)을 식 (5)에 대입하면 다음과 같다.⁽¹⁾

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

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 Si₃N₄ 계 세라믹 절삭공구를 사용하였으며 공작물은 직경 105mm 의 SM45C 탄소강을 사용하였다. 이 실험을 통하여 절삭 토크(T_c)와 절삭부하에 의해 증가한 마찰 토크 증가량(δT_f)의 관계를 Fig. 8 과 9 와 같이 구하였다. Fig. 8 과 9 에서 δT_f 는 T_c 의 2 차식으로 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

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

절삭속도가 일정할 경우 T_c 에 따른 δT_f 의 변화를 2 차식으로 커브 피팅하면 식 (9)의 C 와 D 의 계수를 알아낼 수 있다. 그리고 C 와 D 가 속도에 따라 변하므로 C 는 속도에 대한 3 차식으로, D 는 속도에 대한 2 차식으로 다시 피팅하였다.(Fig. 10, Fig. 11) 커브 피팅 결과를 정리하여 식 (9)에 대입

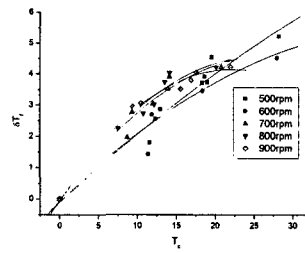


Fig. 8 Frictional torque increment in the speed range of 500~900rpm

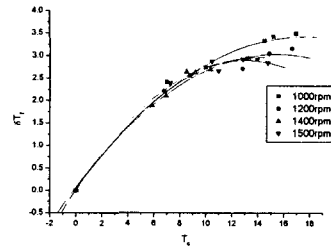


Fig. 9 Frictional torque increment in the speed range of 1000~1500rpm

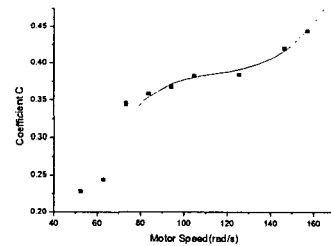


Fig. 10 Curve fitting to determine the coefficient C

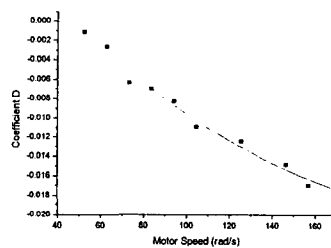


Fig. 11 Curve fitting for determine the coefficient D

하여 최종적인 CNC 선반의 주축 마찰 토크 증가량의 관계식을 나타내면 다음과 같다.

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

식 (10)에 의해 구해진 비선형 마찰 토크 증가량

값을 이용하여 절삭 토크를 계산할 수 있다.

$$T_c(i) + C * T_c(i) + D * T_c(i)^2 = T_e(i) - B\omega_r - T_{fc0} \quad (11)$$

식 (11)은 T_c 에 대한 2 차 방정식이므로 T_c 에 대해 해석적인 해를 얻을 수가 있다.

3. 실험장치 및 토크 추정 알고리즘

3.1 실험장치

실험에 사용된 공작기계는 현대자동차 HiT-15 CNC 선반이고 스피들 모터는 SIEMENS 사의 1PH6137-4NZ00 이며 규격은 Table 1 과 같다. 공구 동력계는 스위스 키슬러사의 9257B 이며 전하 증폭기는 키슬러사의 5019A 를 사용하였다.

U, V, W 의 3 상 전류는 HIOKI 사의 9275 CLAMP ON AC SENSOR 를 사용하여 i_{as}, i_{bs}, i_{cs} 를 측정하였다. 고정자 전류신호와 전하 증폭기에서 나오는 절삭력 신호는 A/D 변환보드는 NI-DAQ PCI-MIO16E-4 board 를 통해 A/D 변환한 후 586PC 에 저장하였고, 객체 지향적 프로그램 작성을 위해 토크 추정 알고리즘에 따라 Graphical programming 기법인 LabVIEW 6.0i^(10,11) 를 사용하여 토크 모니터링 시스템을 구축하였다.

3.2 토크 추정 알고리즘

실험을 위한 전체 알고리즘은 다음과 같다. 우선 i_{as}, i_{bs}, i_{cs} 중 2 개 전류를 측정하고 나머지는 계산한 후 사용한다. 실제의 경우 전동기의 하드웨

어 오류에 의한 추정 오차가 증폭되므로 소프트웨어적으로 신호를 재구성하여 사용한다.⁽⁸⁾ 얻어진 전류신호를 D-q 변환이후 식 (1)로 자화전류를 계산하고 식 (2), (3)으로 각속도를 추정한다. 추정된 각속도와 식 (4)를 이용하여 T_e 를 계산하고 식 (10)에 의하여 계수 C, D 를 계산한 후, 식 (11)의 2 차 방정식을 풀어서 T_c 를 추정한다.

위의 설명을 flow chart 로 표시하면 Fig. 12 와 같다.

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	Value
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

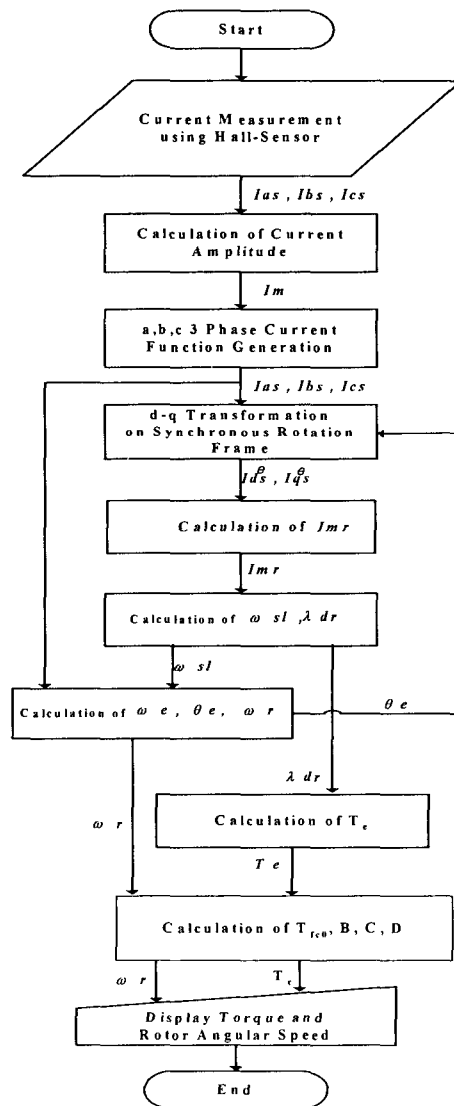


Fig. 12 Cutting torque estimation algorithm

4. 실험 결과

실험은 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 이동평균법을 이용하였다.

실험은 주축의 회전수가 500rpm, 700rpm, 900rpm, 1000rpm, 1500rpm 인 경우 실행되었다. 실험에 사용된 공구는 상용 Si₃N₄ 계 세라믹 절삭공구이며 이송속도는 0.2 mm/rev 이다.

Fig. 13 에서 절삭력은 공구동력계로 측정된 절삭력과 추정된 절삭력을 비교해 2.6%의 오차율을 나타냈고, Fig. 14 에서는 오차율이 3.2%, Fig. 15 에서는 2.84%의 오차율을 보였다. 시간지연(Time delay)은 0.3sec 정도로 양호한 결과를 보였다. Fig. 13 에서 절삭 전의 공구동력계의 절삭력 신호와 절삭 후의 신호 값이 다른 이유는 키퍼사 공구동력계의 특징인 드래프트 현상 때문이다.

실험한 결과 절삭조건 조합에 무관하게 절삭력을 잘 추종함을 알 수 있다.

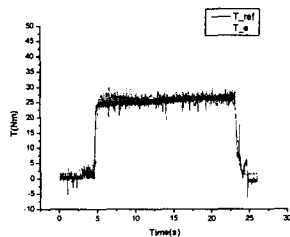


Fig. 13 Estimated and reference cutting torque (Material: Gray cast iron, V=500rpm, d=1mm)

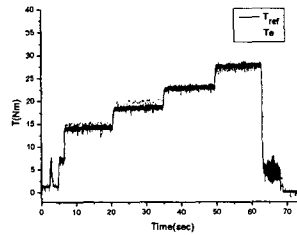


Fig. 16 Estimated and reference cutting torque (Material: SM45C (AISI45), V=500rpm, d=0.5mm, 1mm, 1.5mm, 2mm)

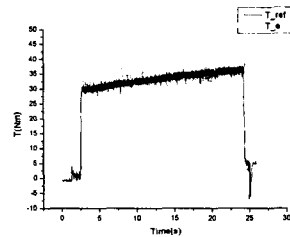


Fig. 14 Estimated and reference cutting torque (Material: SM45C (AISI45), V=700rpm, d=2mm)

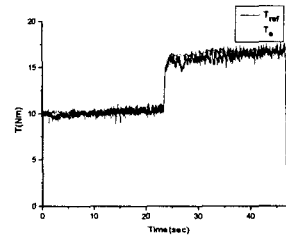


Fig. 17 Estimated and reference cutting torque (Material: SM45C (AISI45), V=900rpm, d=0.5mm, 1mm)

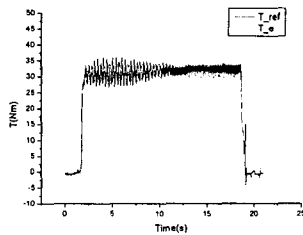


Fig. 15 Estimated and reference cutting torque (Material: SM45C (AISI45), V=1000rpm, d=2mm)

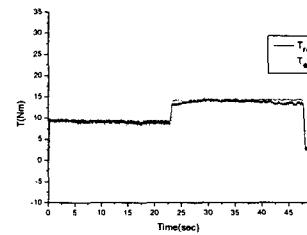


Fig. 18 Estimated and reference cutting torque (Material: SM45C (AISI 45), V=1100 rpm, d=0.5mm, 1mm)

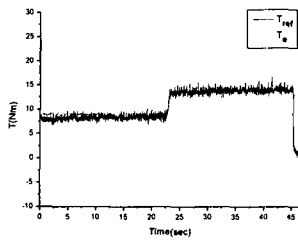


Fig. 19 Estimated and reference cutting torque (Material: SM45C (AISI 45), V=1500 rpm, d=0.5mm, 1mm)

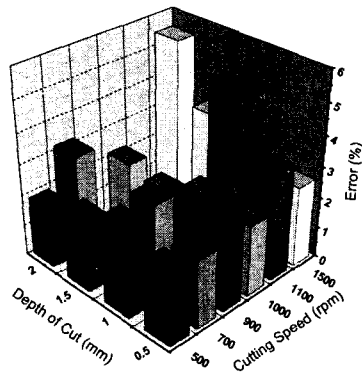


Fig. 20 Errors of estimated cutting torque at given cutting conditions

Table 3 Errors of estimated cutting torque at given cutting conditions (%)

	500rpm	700rpm	900rpm	1000rpm	1100rpm	1500rpm
0.5mm	2.30	2.20	3.30	2.28	3.44	2.60
1.0mm	2.84	3.10	2.78	2.46	5.30	1.87
1.5mm	2.30	-	-	1.88	-	3.60
2.0mm	1.90	3.20	-	2.16	-	5.48

Fig. 16 과 Fig.17~19 는 공작물에 0.5mm 씩의 단을 주고 500rpm, 900rpm, 110rpm, 1500rpm 에서 각각 실험을 한 결과이다. Fig. 17 은 등가감쇠계수를 구하기 위해 사용했던 주축회전수가 아닌 900rpm 으로 실험한 결과이다. Fig. 18 은 절삭 부하에 의한 마찰 토크의 증가량을 구하기 위해 실험한 주축 회전수가 아닌 1100rpm 으로 실험한 결과이다. 그림 20 과 Table 3 에 주어진 절삭조건에서의 오차율이 주어져 있다. 각 단마다 오차율은 조금씩 차이를 보이지만 평균 2.9%의 오차율을 보였다. 가장 큰 오차율은 주축속도 1100rpm, 절삭깊이 1.0mm 일 때와 주축속도 1500rpm, 절삭깊이 2.0mm 일 때로 각각 5.3%, 5.48%의 오차율을 보이

고 있다. 주축 회전수 1100rpm 은 마찰 토크의 증가량을 구하기 위해 실험한 주축 회전수가 아니기 때문에 비교적 다른 속도일 때보다 오차가 크게 나타난다. 주축 회전수 900rpm 도 등가감쇠계수를 구하기 위하여 사용하지 않았기 때문에 비교적 오차가 크게 나타난다. 1500rpm 에서 절삭깊이가 1.5mm 보다 깊어지면 오차가 커지는데 이는 속도가 빨라지고 절삭깊이가 깊어짐에 따라 토크추정 시스템이 실제 토크변화를 잘 추종하지 못해서 나타나는 현상으로 풀이된다. 시간지연은 앞의 실험 결과와 마찬가지로 0.3sec 정도로 나타났다.

5. 결론

- (1) 추정된 유도전동기에서 발생하는 전기적 토크와 유도전동기 각속도 신호를 이용하여 무부하시 쿨롱 마찰 토크 (T_{fc0}) 와 등가감쇠계수 (B) 를 결정하였다.
- (2) 공구 동력계로 측정된 절삭력 신호와 주축 유도전동기의 기계적 부분의 모니터링 모델을 이용하여 비선형 마찰 토크증가 (δT_f) 의 변수를 결정하였다.
- (3) 제안된 알고리즘을 실제 시스템에 적용하여 실험을 한 결과 정상상태에서의 오차는 평균 3%범위 안에 있으므로 제안방법이 매우 잘 작동한다는 것이 증명되었다.

참고문헌

- (1) Lee, K., Jung, J., Kim, J., Huh, K. and Kim, J., 1998, "Development of a Cutting Force Monitoring System for a CNC Lathe," *Jour. of the KSPE*, Spring Conference, pp. 440~444.
- (2) Huh K., Lee K. and Kim J., 1999, "Development of a Cutting Force Monitoring System for a CNC Lathe," *Jour. of KSPE*, Vol. 16, No.1.
- (3) Stein, J. L., Colvin, D., Clever, G. and Wang, C. H., 1986, "Evaluation of DC Servo Machine Tool Feed Drives as Force Sensors," *ASME J. of Dynamic Sys. Meas. and Cont.*, Vol. 108, pp. 279~288.
- (4) Choi Y. J., 1997, "A Study Cutting Force Estimation using Spindle Motor Power Measurement," *Seoul National Univ., Dept. Of Mech. Design*, M. D. Thesis.
- (5) Park, J. J. and Luca, S., 1994, "Cutting Torque Estimation using Spindle Power Measurement," *Trans. of NAMRI/SME*, Vol. 24, pp. 85~90.
- (6) Mannan, M. A., Brooms, S., et al., 1989, "Monitoring and Adaptive Control of Cutting Process by means of Motor Power and Current Measurement," *Annals of CIRP*, Vol. 38,

pp. 347~350.

- (7) Park J. W. and Kwon W. T., 2002, "Speed Sensorless Torque Monitoring of Induction Spindle Motor using Graphic Programming," *Jour. of KSPE*, Vol. 19, No. 10
- (8) Lee I. H. and Kwon W. T., 2001, "The Torque Monitoring System using Current and Speed Measurement," *Jour. of KSPE*, Spring Conference, pp. 125~131.
- (9) Lee I. H. and Kwon W. T., 2001, "Development Of Torque Monitoring System Of Induction Spindle Motor Using G-program LabVIEW," *Jour. of KSPE*, Vol. 18, No. 10, pp. 184~193.
- (10) National Instrument, 2000, "Data Acquisition Basics Manual, Function Reference," NI.
- (11) Gwak, D. Y., 2002, "LabVIEW Control And Monitoring Solution In Basis Of Computer," Ohm Company.