

DC 모터 전류 신호를 이용한 자동나사체결기 토크의 간접측정

이정윤*, 이정우⁺, 이준호⁺

(논문접수일 2003. 10. 1, 심사완료일 2003. 12. 10)

Indirect Measurement of Auto Screw Drive's Torque Using Current Signals of DC Motor

Jung Youn Lee*, Jung Woo Lee⁺, Jun Ho Lee⁺

Abstract

The main objective of the research is to propose an algorithm that to estimate the screwing torque from parameters of DC motor current without using any strain gage and torque cell. The auto screw drive system is divided into two parts, one is the DC motor and the other is mechanical part in which the friction torque and damping ratio are a function of rotational of spindle electro motive force constant. The torque is estimated from the friction torque. The research is concerned with applying the method to an auto screw drive and the advantages and limitations are also discussed in this paper.

Key Words : DC Motor(DC 모터), Auto Screw Drive(자동나사체결기), Screwing Torque(나사체결토크)

1. 서론

오늘날 기업은 급변하는 국내외의 변화와 이로 인해 치열해져 가는 경쟁에 대응하고자 많은 노력을 하고 있다. 이러한 상황 속에서 경쟁력 강화를 위해, 제품 개발 시간 단축과 제품 특성 향상, 제품의 원가 절감 등을 고려한 제품의 신뢰도 향상과 급변하는 수요자의 요구에 신속히 대처할 수 있는 제품의 다양화 및 고급화가 당연하고 있는 우선적 과제로 대두되고 있다.

특히, 전기 전자 및 기계조립업체에서는 생산 라인 중

나사 체결 공정이 차지하는 비중이 대단히 높다. 현재 나사체결 공정은 대부분의 기업에서 작업자가 콘베이어 위에 흐르는 제품을 핸드 드라이버를 이용하여 반자동으로 조립하고 작업자의 숙련도에 생산능력을 의존하는 상태이다.

따라서 조립 인건비와 생산 원가를 절감하기 위해 가격이 저렴한 자동나사 체결기의 개발이 시급한 실정이다.

이를 위해 DC모터의 전류로부터 체결부위의 토크를 예측하는 연구가 필요하다. AC모터는 부하변동에 따라 회전수 변화가 거의 없으나, DC모터는 회전수가 변하므로 시간에 대한 전류 및 체결부 토크를 잘 예측할 수 있기 때문

* 주저자, 경기대학교 기계시스템디자인 공학부 (jylee@kyonggi.ac.kr)

주소: 443-760 경기도 수원시 영통구 의의동 산 94-6

+ 경기대학교 기계공학과 대학원

에 DC모터를 이용하여 연구를 수행하였다. 이에 대한 연구로는 김기대^(1,2) 등은 CNC선반의 전류신호를 이용하여 공구에 부하되는 절삭력과 마찰력을 고려한 이송전류신호로서 절삭력을 추정하였고, 홍익준⁽³⁾ 등은 유도전동기와 고정자 전류만으로 절삭력을 추정하였다. 또한 Stein⁽⁴⁾ 등은 모터의 전류와 속도를 이용하여 절삭력을 추정하였고, 허진수⁽⁵⁾ 등은 교류 주축 드라이브(AC spindle-drive) 모델을 이용하여 절삭력을 추정하였다. 그러나 대부분의 연구들이 CNC 선반에서의 절삭력을 추정하는 연구들로 나사 체결부의 동적 토크 해석에 관한 연구는 미비한 형편이다.

본 논문에서는 스트레인 게이지나 토크 셀을 사용하지 않고 DC 모터의 파라미터와 DC모터의 전류로부터 나사 체결부의 토크를 예측하는 새로운 알고리즘을 제안한다. 이 알고리즘은 DC모터 전류만을 가지고 토크를 예측하므로 부가적 하드웨어 없이 시스템에 적용이 가능하며, 실험 결과와 비교하여 타당성을 검증한다.

2. 이론

2.1 유도전동기의 전압과 부하 모델

Fig. 1은 모터 부분의 전원부와 나사체결기를 나타낸 그림이며, 뉴턴과 키르호프 법칙을 조합하여 식 (1), (2)으로 나타낼 수 있다.

$$J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} = Ki - T_L(t) \quad (1)$$

$$L\frac{di}{dt} + Ri = V(t) - K\dot{\theta} \quad (2)$$

여기서, J 는 로터 와 감속기, 나사 드라이버의 회전 관성 모멘트, L 은 전기 인덕턴스, b 는 유도전동기 시스템의 감쇠비, K 는 기전력 상수, R 은 전기저항, $V(t)$ 는 전압, $T_L(t)$ 은 나사체결시 시스템에 걸리는 토크, i 는 전류, θ 는 나사의 회전각이다.

위의 식 (1), (2)으로부터 식 (3)을 나타낼 수 있다.

$$\frac{LJ}{K}\ddot{\theta} + \left(\frac{Lb}{K} + \frac{RJ}{K}\right)\dot{\theta} + \left(\frac{Rb}{K} + K\right)\theta = V(t) - \frac{RT_L(t)}{K} - \frac{L}{K}\frac{dT_L(t)}{dt} \quad (3)$$

전류는 식 (1)으로부터 식 (4)으로 나타낼 수 있고, 모터 토크 T_{motor} 는 모터에 흐르는 전류 i 와 기전력 상수 K 의

곱으로 표시되므로 식 (5)이 된다.

$$i = \frac{1}{K}J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + T_L(t) \quad (4)$$

$$T_{motor} = Ki \quad (5)$$

Fig. 2는 나사체결기에 사용한 DC모터의 전압곡선의 시간의 따른 변화를 나타낸 그림이다.

최대 전압은 24V이며 전원이 투입되면 지정된 t_1 초까지 모터의 전압은 24V까지 이르고 t_2 초까지 일정하게 유지한 다음, 모터의 회전속도를 감소하기 위해 t_3 초까지 전압을 떨어뜨린다. 그런 다음 전압을 V_1 으로 일정하게 유지하였다.

2.2 유도전동기의 전류와 토크

나사체결기의 전류와 토크 관계를 규명하기 위해 전류와 토크를 네 부분으로 나누어 고려하였다. 네 구간에서의 전

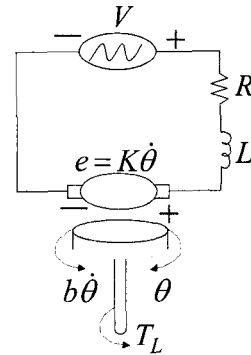


Fig. 1 The electric circuit of armature and free body diagram of system

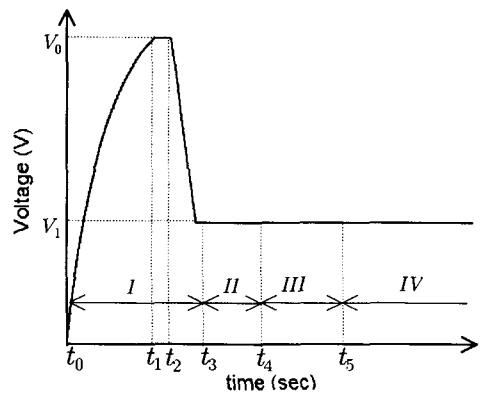


Fig. 2 Voltage variations according to time

류와 모터 토크는 식 (4), (5)으로 되며 각 구간에서 $T_L(t)$ 의 값이 변화된다.

2.2.1 시간 $t_0 \sim t_3$ 까지 I 구간

I 구간은 Fig. 2에서 나사체결기의 드라이버가 회전하여 나사까지 오는 구간으로 부하로 걸리는 토크는 감속기 기어 및 베어링 마찰에서 발생되며 일정하게 볼 수 있다. 이 마찰 토크를 $T_{\mu 1}$ 으로 나타내었으며 $T_L(t)$ 은 $T_{\mu 1}$ 이 된다.

2.2.2 시간 $t_3 \sim t_4$ 까지 II 구간

II 구간은 Fig. 2에서 나사체결기의 드라이버가 나사에 도달하여 슛나사가 암나사와 체결이 되고 슛나사가 스프링 와셔와 만나기 전까지의 구간으로 부하에 걸리는 토크는 앞에서 언급한 토크 이외에 슛나사와 암나사 사이의 일정한 축력이 발생하고 추가 마찰 토크인 $T_{\mu 2}$ 가 걸리게 되며, $T_L(t)$ 은 $T_{\mu 1} + T_{\mu 2}$ 로 된다.

2.2.3 시간 $t_4 \sim t_5$ 까지 III 구간

III 구간은 Fig. 2에서 나사체결기의 드라이버가 스프링 와셔를 체결하는 구간으로 회전하는 슛나사로 인하여 스프링 와셔가 나사의 회전각 $(\theta - \theta_{t4})$ 에 비례하여 압축되므로 추가로 마찰 토크가 발생된다. 따라서 추가 마찰 토크 $T_{\mu\omega}(\theta - \theta_{t4})$ 를 고려하여 $T_L(t) = T_{\mu 1} + T_{\mu 2} + T_{\mu\omega}(\theta - \theta_{t4})$ 가 된다. 여기서 θ_{t4} 는 슛나사가 스프링 와셔를 체결하기 전의 회전각이다.

이 구간에서의 미분방정식은 식 (1)에서 다음과 같이 된다.

$$J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} = Ki - T_{\mu 1} - T_{\mu 2} - T_{\mu\omega}(\theta - \theta_{t4}) \quad (6)$$

식 (2), (6)으로부터 아래식이 유도된다.

$$\begin{aligned} \frac{LJ}{K}\ddot{\theta} + \left(\frac{Lb}{K} + \frac{RJ}{K}\right)\dot{\theta} + \left(\frac{Rb + T_{\mu\omega}L}{K} + K\right)\theta + \frac{RT_{\mu\omega}}{K}\theta \\ = V(t) - \frac{R(T_{\mu 1} + T_{\mu 2} - RT_{\mu\omega}\theta_{t4})}{K} \end{aligned} \quad (7)$$

2.2.4 시간 t_5 이후 IV 구간

IV 구간은 Fig. 2에서 슛나사가 스프링 와셔를 완전히 체결하여 강성이 급격히 증가하는 구간으로 추가 마찰토크 $T_{\mu\omega 1}(\theta - \theta_{t5})$ 가 걸리고, $T_L(t)$ 은 $T_{\mu 1} + T_{\mu 2} + T(\theta - \theta_{t5})$ 가 된다.

여기서, θ_{t5} 는 스프링 와셔의 완전 체결 후 회전각이다.

2.3 나사체결시 걸리는 토크

나사 체결에 걸리는 토크 (T_{screw})는 스프링 와셔를 체결 하면서 발생하는 마찰토크와 스프링 와셔가 완전히 체결되어 강성이 증가하여 발생하는 마찰토크의 합으로 나타내어 진다.

$$T_{screw} = T_{\mu\omega}(\theta_{t5} - \theta_{t4}) + T_{\mu\omega 1}(\theta - \theta_{t5}) \quad (8)$$

3. 실험 및 결과

3.1 실험장치

Fig. 3은 실험에 사용된 나사체결 장치로서 모터는 신영 전기에서 제작한 DC모터로 모델은 S-8G9Y이고, 제원은 전압 24V, 출력 40W, 최대회전수 3600rpm, 감속비는 9:1 이고, 실험에 사용된 나사는 M5 렌치 나사이다. 또한 나사 체결 시 일정시간 나사체결 후 전류가 안정화되면, 전류가

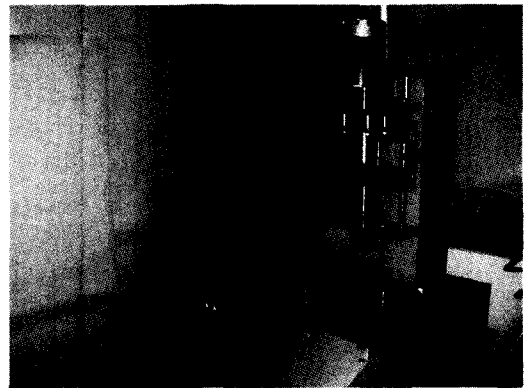


Fig. 3 Experimental set-up

Table 1 Specifications of the experimental motor

parameter	measurement
moment of inertia(J)	$8.97 \times 10^{-5} \text{ kgm}^2/\text{s}^2$
resistance(R)	7.50 hm
inductance(L)	1.07 mH
voltage(V)	23.10 V
current(I)	1.05 A

차단되도록 설계하였다. 또한, 실험 데이터의 정확한 측정을 위하여 디지털 오실로스코프(LeCroy 9310A)를 사용하였으며 모터의 물리적 변수 값들을 측정하여 Table 1에 나타내었다.

3.2 마찰토크 변수의 측정

Table 2는 실험으로 구한 마찰토크를 나타낸 값으로 식 (1), (2)으로부터 각속도 $\dot{\theta}$ 가 일정하게 회전할 경우 각 가속도 $\ddot{\theta}$ 가 0이 되므로 마찰토크 변수인 감쇠비 b 와 기전력 K 상수를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$b = (Ki - T_L(t)) / \dot{\theta} \quad (9)$$

$$K = (V(t) - Ri) / \dot{\theta} \quad (10)$$

각속도 $\dot{\theta}$ 는 정격전압이 100%일 때의 회전수를 스트로스코프(B&K type4912)를 이용하여 측정하였다.

3.3 실험결과

Fig. 4는 전압변화에 따른 전류의 변화를 시뮬레이션 및 실험 결과로 나타낸 그림이다. 정격 전압 24V를 100%로 기준 하여 85%, 70%, 55%, 40%로 전압을 변경하였다.

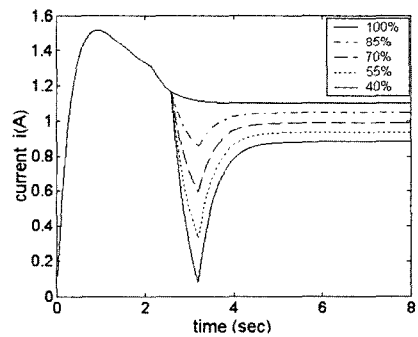
Fig. 4에서 (a)와 (b)의 전류를 비교해보면 시뮬레이션과 실험으로 측정된 전류가 잘 일치하는 것을 알 수 있고, 이로부터 전류를 이용하여 나사 체결토크를 예측할 수 있다. 나사를 체결시 정격 전압의 70% 이상 경우는 나사 체결 과정에서 충격이 발생하였으며 정격 전압의 40%의 경우는 충격 없이 나사가 잘 체결되었다. 이런 이유로 정격전압의

40%인 경우의 나사체결 토크를 시뮬레이션과 실험을 통해 비교하였다.

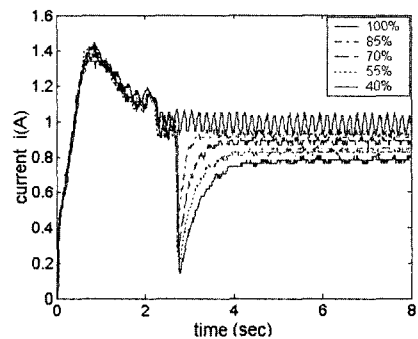
Fig. 5은 전압이 정격전압의 40%일 때, 나사 체결 전후의 전류 변화를 나타낸 것이다. Fig. 5에서 (a)와 (b)를 비교해보면 시뮬레이션과 실험이 일치하는 것을 알 수 있다. Fig. 5(b)의 I_1 구간은 정상상태 속도 도달구간이며, I_2 구간은 속도가 감속하는 구간, I_3 구간은 와서 체결 구간이며, I_4 구간은 와서 체결 후 나사가 체결을 완료하는 구간이다.

Fig. 6은 전류로부터 시뮬레이션을 통하여 하중과 마찰이 작용할 때의 모터에 의한 토크 식 (5)과 나사 체결 시 걸리는 토크 식 (8)을 시뮬레이션으로 나타낸 그림이다. 나사가 체결하기 전 까지 모터에 걸린 토크는 마찰 저항과 모터와 감속기의 가속하는데 사용되었다. 그림에서 모터 토크가 나사 체결 토크보다 큰 것은 나사체결시 모터 토크의 일부가 마찰 토크로 변환되었기 때문이다.

Fig. 7은 나사에 걸린 토크를 시뮬레이션과 실험결과를 비교한 것으로 20번 실험을 하였다. 실선은 Fig. 6에서 나



(a) Simulation

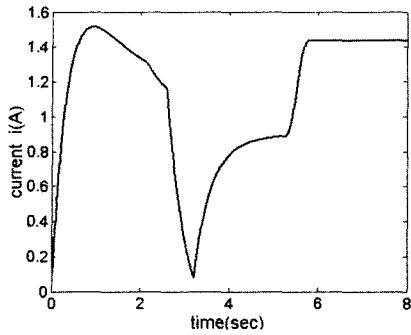


(b) Experiment

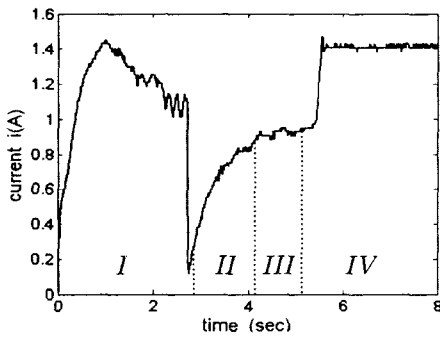
Table 2 Parameter of friction torque of motor, reduce and system

parameter	measurement
friction torque($T_{\mu 1}$)	0.0271 Nm
friction torque($T_{\mu 2}$)	0.0064 Nm
angle speed($\dot{\theta}$)	6.7 rad/s
friction torque($T_{\mu w}$)	0.0002 Nm
friction torque($T_{\mu ol}$)	0.004 Nm
damping ratio(b)	4.2294×10^{-5} Nms
electromotive force constant(K)	0.0392 Nm/Amp

Fig. 4 Measured current according to voltage variations



(a) Simulation



(b) Experimental

Fig. 5 Measured current in the voltage 40%

사체결 토크가 일정해지는 시간에서의 토크이고 ◇ 표시는 토크 측정기로 측정된 결과로서 측정치는 Table 3에 나타나 있다. 나사 체결 토크가 시물레이션과 실험이 잘 일치함을 알 수 있다.

4. 결론

- (1) DC 모터에서 발생하는 토크와 각속도 신호를 이용하여 기전력 상수 K 와 시스템의 감쇠비 b 를 결정하였다.
- (2) DC 모터부터 측정된 나사체결시의 전류와 시스템의 모델링을 통하여 나사 체결부에서의 토크를 결정하는 알고리즘을 제안하였다.
- (3) 본 알고리즘을 실제 시스템에 적용하여 실험한 결과 시물레이션을 통한 나사체결토크 0.0431 N-m와 실험결과 값이 잘 일치하여 제안된 방법의 타당함을 알 수 있었다.

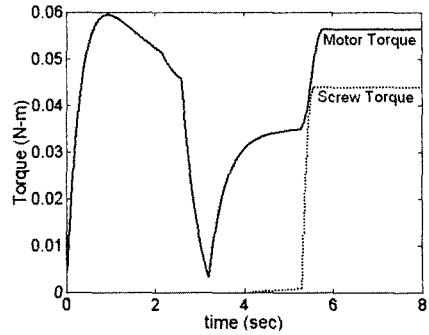


Fig. 6 Torque simulation according to voltage variations

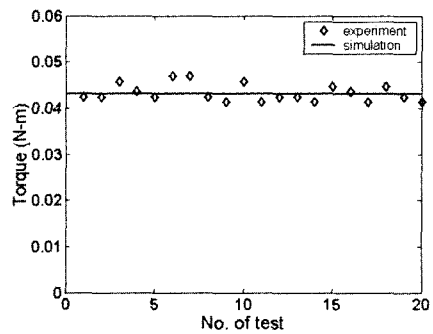


Fig. 7 Screwing torque in the simulation and experiment

후기

이 논문은 2003년도 산학연 공동기술개발 컨소시엄 사업에 의해 지원되었으며 이에 감사 드립니다.

참고 문헌

- (1) Kim, G. D., Kwon, Y. T., and Chu, J. N., 1997, "Indirect Cutting Force Measurement an Cutting Force Regulation Using Spindle Motor Current", *Journal of the Korea Society of Precision Engineering*, Vol. 14, No. 10, pp. 18~27.
- (2) Kim, G. D., Choi, Y. J., Oh, Y. T., and Kim, C. N., 1997, "Frictional Behavior And Indirect Cutting Force Measurement in a Machining Center Using Feed Motor Current", *Journal of the Korea Society of Precision Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 78~87.

- (3) Hong, I. J., and Kwon, W. T., 2002, "Speed Sensorless Torque Monitoring of Induction Spindle Motor On Machine Tool", *Journal of the Korea Society of Precision Engineering Autumn Conference*, pp. 18~23.
- (4) Stein, J. L., and Huh, K. S., 2002, "Monitoring Cutting Forces in Turning: A Model- Based Approach", *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 124, pp. 26~31.
- (5) Huh, K. S., and Lee, K. K., 2000, "Cutting Force Estimation Systems Based on AC Spindle Drive", *JSME International Journal Series C*, Vol. 43, No. 1, pp. 230~236.
- (6) Kim, U. M., and Park, S. H., 1991, *Circuit Technology of Motor Rotation*, Sehwa Publishing Inc.
- (7) The editorial department, 1996, *Control circuit design of DC motor*, Sewoon publishing Inc.