

DC 모터 전류 신호를 이용한 자동나사체결기 토크의 간접측정

이정윤*(경기대 기계설계디자인공학부), 이정우** (경기대원), 이준호**(경기대원)

(Indirect Measurement of Torque of the Auto Screw Drive to
using the Current Signals of DC Motor)

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

Abstract

This paper proposes an algorithm to estimate the screw torque from parameters of induction motor and current of DC motor without strain gage and torque cell. The parameters of friction torque search for damping ratio and electromotive force constant, use the motor torque and angular speed signals be generated in the induction motor, make use of oscilloscope and stroboscope for precise measured of experimental data, measured physical parameters through experimental. In addition, the screw torque estimated use of measured current signals from induction motor. The results, theory and simulation recognized well coincidence.

Key Words : DC motor (DC 모터), the current signal(전류신호), Auto screw drive(자동나사체결기)

1. 서 론

오늘날 기업은 급변하는 국내외의 변화와 이로 인해 치열해져 가는 경쟁에 대응하고자 많은 노력을 하고 있다. 이러한 상황 속에서 경쟁력 강화를 위해, 제품 개발 시간단축과 제품 특성 향상, 제품의 원가 절감 등을 고려한 제품의 신뢰도 향상과 급변하는 수요자의 요구에 신속히 대

처 할 수 있는 제품의 다양화 및 고급화가 당연하고 있는 우선적 과제로 대두 되고 있다.

각 기업이 당연하고 있는 시급한 생산 자동화 기술 개발 과제 중 특히, 전기 전자 및 기계조립업체에서는 생산 라인 중 나사 체결 공정이 차지 하는 비중이 대단히 높다. 현재 나사체결 공정은 대부분의 기업에서 작업자가 큰 베이어 상에 흐르는 제품을 핸드 드라이버 를 이용하

* 주저자, 경기 대학교 기계 시스템 디자인 공학부 (jylee@kyonggi.ac.kr)

주소: 경기도 수원시 팔달구 의의동 산 94-6

** 경기대학교 기계공학과 대학원

여 반자동으로 조립하고 작업자의 숙련도에 생산 능력을 의존하는 상태이다.

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

CNC선반에서의 절삭력을 추정하는 연구들은 수행되어져 왔으나 나사 체결부의 동적 토크 해석에 관한 연구는 미비한 형편이다.

김기대^{(1),(2)} 등은 CNC선반의 전류신호를 이용하여 공구에 부하되는 절삭력과 마찰력을 고려한 이송 전류신호로서 절삭력을 추정하였고, 홍익준⁽³⁾ 등은 유도전동기와 고정자전류 만으로 절삭력을 추정하였다. 또한 Stein⁽⁴⁾은 모터의 전류와 속도를 이용하여 절삭력을 추정하였고, 허건수⁽⁵⁾는 교류 주축 드라이브(AC spindle-drive)모형을 이용하여 절삭력을 추정하였다.

본 논문에서는 스트레인 게이지나 토크 셀을 사용하지 않고 유도 전동기의 파라미터와 DC모터의 전류로부터 나사 체결부의 토크를 예측하는 새로운 알고리즘을 제안, 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. 1에서 뉴턴과 키르호프 법칙을 조합하여 (1), (2)식으로 나타낼 수 있다.

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

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

여기서, $J[\text{kgm}^2/\text{s}^2]$ 는 로터의 회전 관성 모멘트, $L[\text{mH}]$ 은 전기 인덕턴스, $b[\text{Nms}]$ 는 유도전동기 시스템의 감쇠비, $K[\text{Nm/Amp}]$ 는 기전력 상수, $R[\text{Ohm}]$ 은 전기저항, $V(t)[\text{V}]$ 는 전압, $T_L(t)[\text{Nm}]$ 은 하중 토크, $i[\text{A}]$ 는 전류, $\theta[\text{rad}]$ 는 회전 각이다.

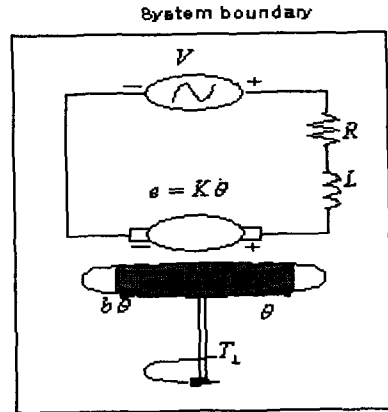


Fig.1 The electric circuit of the armature and the free body diagram of the rotor

위의 (1), (2)식으로부터 아래 식이 구해진다.

$$\begin{aligned} \frac{LJ}{K}\ddot{\theta} + \frac{Lb + RJ}{K}\dot{\theta} + \frac{Rb + K^2}{K}\theta \\ = V(t) - \frac{RT_L(t)}{K} \end{aligned} \quad (3)$$

전류는 (1)식으로부터 (4)식으로 유도 되며, 모터 토크 T_{motor} 는 모터에 흐르는 전류 i 와 기전력상수 K 의 곱으로 표시되므로 (5)식이 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 시간의 변화에 따른 전압곡선이다.

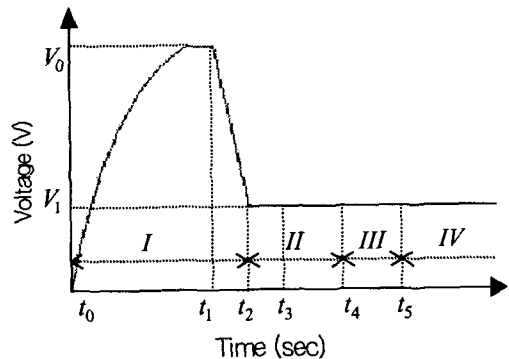


Fig.2 Voltage variations according to time

2.2 유도전동기의 전류와 토크

나사체결기의 전류와 토크 관계를 규명하기 위해 전류와 토크를 네 부분으로 나누어 고려하였다. 네 구간에서의 전류와 모터 토크는 (4),(5)식이 되며, 각 구간에서의 $T_L(t)$ 의 값이 변화하게 된다.

1) 시간 $t_0 \sim t_2$ 까지 I구간

I구간은 Fig. 2에서 나사체결기의 드라이버가 회전하여 나사까지 오는 구간으로 부하로 걸리는 토크는 감속기 기어 및 베어링 마찰 $T_{\mu 1}$ 으로 구성되며 $T_L(t)$ 은 $T_{\mu 1}$ 이 된다.

2) 시간 $t_2 \sim t_4$ 까지 II구간

II구간은 Fig. 2에서 나사체결기의 드라이버가 나사에 도달하여 슛나사가 암나사와 체결이 되면서 슛나사가 스프링 와셔와 만나기 전까지의 구간으로 부하에 걸리는 토크는 앞에서 언급한 토크 이외에 슛나사와 암나사 사이의 축력에 의한 추가 마찰인 $T_{\mu 2}$ 가 걸리게 되고, $T_L(t)$ 가 $T_{\mu 1} + T_{\mu 2}$ 로 된다.

3) 시간 $t_4 \sim t_5$ 까지 III구간

III구간은 Fig. 2에서 나사체결기의 드라이버가 스프링 와셔를 체결하는 구간으로 회전하는 슛나사로인하여 스프링 와셔가 θ 에 비례하여 마찰이 발생하므로 추가마찰토크 $T_{\mu w}(\theta - \theta_{t4})$ 를 고려하여야 하고, $T_L(t)$ 은 $T_{\mu 1} + T_{\mu 2} + T(\theta - \theta_{t4})$ 가 되며 (1)식은 다음과 같이 된다. 여기서, θ_{t4} 는 슛나사가 스프링 와셔를 체결하기 전의 회전각이고, 상수 이다.

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

(2),(6)식으로부터 아래식이 유도 된다.

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

4) 시간 t_5 이후 IV구간

IV구간은 Fig. 2에서 슛나사가 스프링 와셔를 완전히 체결하여 강성이 급격히 증가 하는 구간으로 추가 마찰토크 $T_{\mu w1}(\theta - \theta_{t5})$ 가 걸리고, $T_L(t)$ 은 $T_{\mu 1} + T_{\mu 2} + T(\theta - \theta_{t4})$ 가 되며, Fig. 5에서 보는 것과 같이 쿨롱 마찰의 영향으로 정지해서 일정하게 된다.

여기서, θ_{t5} 는 스프링 와셔의 완전 체결 후 회전각으로 상수 이다.

나사 체결시의 토크(T_{screw})는 스프링 와셔를 체결하면서 발생하는 마찰토크와 스프링 와셔가 완전히 체결되어 강성이 급격히 증가하여 발생하는 마찰토크의 합으로 나타난다.

$$T_{screw} = T_{\mu w}(\theta_{t5} - \theta_{t4}) + T_{\mu w1}(\theta - \theta_{t5}) \quad (8)$$

3. 실험 및 결과

3.1 실험장치

Fig. 3은 실험에 사용된 나사체결 장치로서 모터는 신영전기에서 제작한DC모터로서 S-8G9Y이고, 재원은 24V, 40W, 3600 rpm이며 감속비는 9:1이고, 실험에 사용된 나사는 M5 렌치 나사이다. 또한 나사 체결



Fig.3 Experimental set-up

시 일정시간 나사체결 후 전류가 안정화 되면 전류를 차단 되게 하였다. 또한, 실험데이터의 정확한 측정을 위하여 디지털 오실로스코프(LeCroy 9310A)를 사용하였다. 실험에 사용되는 모터의 물리적 변수 값들을 측정하여 Table 1에 나타내었다.

Table 1 The specifications of the experimental motor

J(Moment of inertia of the rotor)	8.9661×10 ⁻⁵ kgm ² /s ²
R (Resistance)	7.5 Ohm
L (Inductance)	1.07 mH
V (Voltage)	23.10 V
I (Ampere)	1.05 A

3.2 마찰토크 변수의 측정

Table 2는 실험으로 구한 마찰토크의 상수로 (1),(2)식으로부터 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.

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

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

Table 2 The friction torque parameter of experimental motor

$T_{\mu 1}$ (Friction torque)	0.0271	Nm
$T_{\mu 2}$ (Friction torque)	0.0064	Nm
$\dot{\theta}$ (Angle speed)	6.7	rad/s
$T_{\mu w}$ (Friction torque)	0.0002	Nm
$T_{\mu w 1}$ (Friction torque)	0.004	Nm
b (damping ratio)	4.2294×10 ⁻⁵	Nms
K (Electromotive force constant)	0.0392	Nm/Amp

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

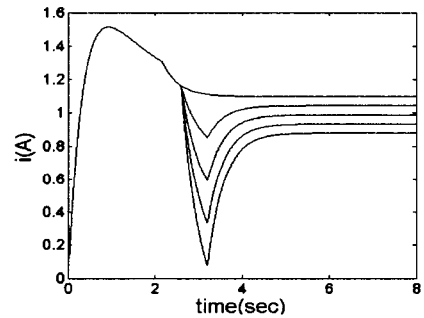
3.3 실험결과

Fig. 4는 시간에 따른 전압의 변화들을 초기 전압을 기준하여 100%, 85%, 70%, 55%, 40% 등의 5가지로 나타내었으며, 이 전압에 따른 전류의 변화를 살펴 보았다.

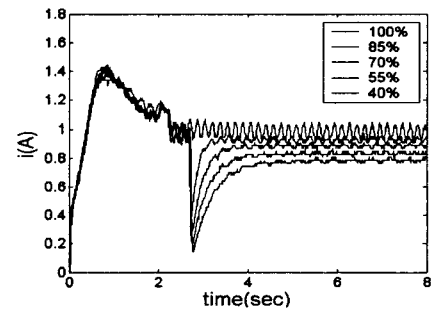
Fig. 4에서 보는 것과 같이 (a)와 (b)를 비교해보면 시뮬레이션과 실험으로 측정된 전류가 잘 일치 하는 것을 알 수 있고, 이를 이용하여

예측하는 일이 가능하게 되었다.

Fig. 5은 전압이 정격전압의 40%일 때, 나사체결 전후의 전류 변화를 나타낸 것이다. Fig. 5에서 (a)와 (b)를 비교 해보면 시뮬레이션과 실험이 일치 하는 것을 알 수 있다.

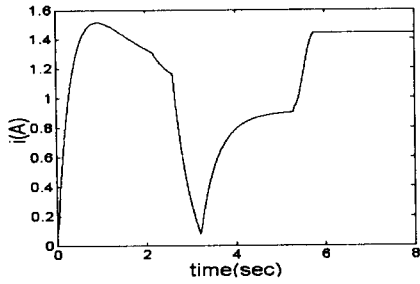


(a) Simulation

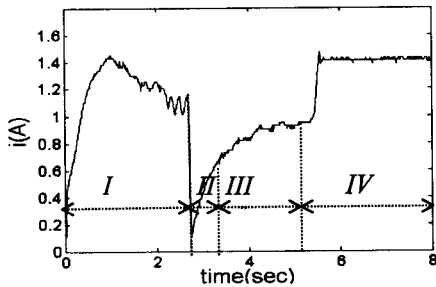


(b) Experimental

Fig. 4 Measured Ampere according to Voltage Variations



(a) Simulation



(b) Experimental

Fig. 5 Measured Ampere in the Voltage 40%

Fig. 5 (b)의 I구간은 정상상태 속도 도달구간이며, II는 속도 변화 구간, III은 와서 체결구간이며, IV구간은 와서 체결후 와서 마찰토크에 의해 급격히 전류가 상승하였다가 쿨롱 마찰이 걸려 정지해 있는 구간이다.

Fig. 6은 시뮬레이션을 통하여 하중과 마찰이 작용할 때의 모터에 의한 토크 (5)식과 나사 체결 시 걸리는 토크 (8)식을 시뮬레이션으로 나타낸 그림이다.

Fig.7에서 실선은 Fig. 6에서의 나사체결 토크가 일정해지는 시간에서의 토크 이고, Fig.7은 토크 측정기로부터 반복 측정한 데이터를 시뮬레이션한 것과 함께 나타낸 것이다. 이론적인 방정식에 의해 시뮬레이션 한 것과 실험을 통하여 나사 체결 후 토크가 잘 일치함을 알 수 있다.

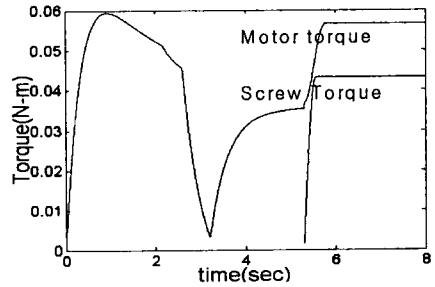


Fig.6 Torque simulation according to voltage variations

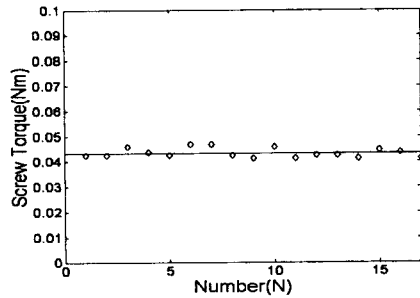


Fig.7 Screw torque in the simulation and experimental

4. 결 론

- 1) 추정된 유도전동기에서 발생하는 토크와 각속도 신호를 이용하여 무 마찰 시 기전력 상수 K 와 유도전동기 시스템의 감쇠비 b 를 결정하였다.
- 2) 유도전동기로부터 측정된 나사체결시의 전류 신호와 주축 유도전동기의 모델식을 이용하여 나사 체결부에서의 토크를 결정 하였다.
- 3) 본 알고리즘을 실제 시스템에 적용하여 실험한 결과 시뮬레이션과 실험 결과가 잘 일치하였다.

참고 문헌

- 1 G.D. Kim, Y.T. Kwon, J.N. Chu, 1997, "Indirect Cutting Force Measurement and Cutting Force Regulation Using Spindle Motor Current ", Journal of the Korea Society of Precision Engineering, Vol. 14, No. 10, pp. 18~27
2. G.D. Kim, Y.J. Choi, Y.T. Oh, C.N. Kim 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 I.J.Hong, W.T.Kwon, 2002, "Speed Sensor-less Torque Monitoring of Induction Spindle Motor On Machine Tool", Journal of the Korea Society of Precision Engineering, Autumn Conference, pp. 18~23
4. Jeffrey L. Stein and Kunsoo Huh, 2002, "Monitoring Cutting Forces in Turning: A Model-Based Approach", *ASEM Journal of Manufacturing Science and Engineering*. Vol. 124, pp. 26~31
- 5.. Kunsoo Huh and Kang-Kyu Lee, 2000, "Cutting Force Estimation Systems Based on AC Spindle Drive", *JSME International Journal Series C*, Vol. 43, No. 1, pp. 230~236
6. 김응묵, 박선호 편역, "모터회전의 회로기술", 세화출판사, 1991
7. 편집부 편, "DC 모터의 制御回路設計", 세운출판사, 1996