

전동기 시스템의 미지외란 및 전류 관측기 설계

Design of Unknown Disturbance and Current Observer for Electric Motor Systems

이 명 석, 정 경 모, 공 경 철*

(Myoungseok Lee¹, Kyungmo Jung², and Kyoungchul Kong^{1,*})

¹Department of Mechanical Engineering, Sogang University

²Human Factors & Devices Research Team, Hyundai Motor Company

Abstract: DOB (Disturbance Observer) is a useful control method for estimating the disturbance applied to dynamic systems. Disturbance observer can be used to implement a robust control system to generate a control input for rejecting the disturbance, and it can be also used to estimate the disturbance to obtain information. The system that uses disturbance estimation is investigated for high performance control such as automatic door systems, walking robot and electric power steering system in vehicles. In this paper, a novel disturbance observer which is called disturbance and current observer for estimating load torque in the motor system is proposed. The difference between the DOB for disturbance rejection and DCOB is mathematically verified. Current and angular velocity are required for estimating the load torque of the motor in DOB. However, the DCOB can estimate load torque and current without current sensor. DCOB is designed based on modeling of the motor system. Appropriate Q-filter is selected and the applicability of DCOB is verified by simulation. The estimated disturbance and current of the electric motor can be verified without current sensor, as experiments of the actual motor system.

Keywords: disturbance observer, current observer, motor system

I. 서론

최근 동역학 모델을 기반으로 고성능 제어를 구현하는 모델기반 제어기법이 주목받고 있다. 시스템 모델을 기반으로 하는 외란 관측기(disturbance observer)는 동적 시스템에 인가되는 외란을 추정하여 이를 보상하여 외란의 영향을 제거하는 제어 알고리즘이다[1]. 외란 관측기는 추정된 외란을 기반으로 외란을 제거하는 제어 입력을 생성하여 강인제어 시스템을 구성하는데 사용될 수 있으며, 외란 자체를 추정하여 시스템의 정보를 얻는 용도로도 사용될 수 있다. 자동차 시스템, 보행 로봇, 자동차의 전동식 파워 스티어링 등은 외란 추정 정보를 활용하여 제어하는 시스템이다. 구체적으로 자동차 시스템은 외란 추정 정보를 통해 사람 및 물건의 끼임을 검출하여 안전 작동하는 알고리즘을 적용한다[2]. 이동 로봇은 외란 추정 정보를 이용해 지면반력을 추정하고, 로봇의 균형 및 보행 패턴을 판단하기도 하며[3], 로봇의 위치 제어 성능 향상에 도움을 주기도 한다[4,5]. 자동차의 전동식 파워 스티어링은 외란 추정 정보를 통해 운전자의 의도를 파악하여 핸들링을 보조해 주는 역

할을 한다[6]. 외란 관측기는 시스템 모델을 기반으로 하기 때문에 시스템 인식(system identification)이나 역학을 통해 모델링을 한다[7]. 일반적인 전동기 시스템에서는 편의상 전동기의 입력 전압에서부터 출력 각속도를 시스템으로 모델링하는 경우가 많다. 하지만 추정되는 외란의 크기를 정확하게 알기 어려운 경우가 많아 실험적 결과를 기반으로 하여 곡선 적합(curve fitting) 및 스케일링 등 추가적인 연산이 필요하다[3].

본 논문은 위와 같은 문제점들을 개선하기 위해 전동기 시스템의 외부 토크를 추정하기 위한 새로운 방식의 외란 관측기 설계를 제안한다. 외란 관측기를 사용하여 전동기의 부하 토크의 정확한 크기를 추정하고자 할 때, 전류와 전동기의 회전 각속도 정보가 필요하다[8,9]. 이를 모델링한 전동기 시스템을 바탕으로 일반적인 외란 관측기와 어떤 차이가 있는지를 수학적으로 검증한다. 제안한 관측기는 전류 센서를 사용하지 않고 외란 추정이 가능하며, 더불어 전류 추정까지 가능하다. 본 논문에서 이를 외란 전류 관측기(disturbance and current observer)라고 일컫는다. 전동기의 역학 특성을 바탕으로 모델링한 뒤 외란 관측기를 설계한다. 이를 시뮬레이션 및 실험을 통해 적절한 Q-필터를 선정하고 적용 가능성을 확인하였다. 또한 실제 전동기 시스템의 실험을 통해서 전류 센서 없이 전동기의 외란을 추정하는 것을 검증할 수 있었다.

II. 시스템 모델링

1. 전동기 시스템의 모델링

* Corresponding Author

Manuscript received March 14, 2015 / revised May 3, 2015 / accepted May 6, 2015

이명석, 공경철: 서강대학교 기계공학과

(jeff0115@sogang.ac.kr/kckong@sogang.ac.kr)

정경모: 현대자동차 인간편의연구팀(km904@hyundai.com)

* 본 논문은 현대자동차의 지원을 받아 수행된 연구임.

* 본 논문은 2014년도 산학협동재단 신진교수 연구비 후원을 받아 수행된 연구임.

외란 전류 관측기의 해석과 시뮬레이션을 위한 전동기의 전압 방정식은 다음과 같다.

$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + e(t) \quad (1)$$

여기서 $v(t)$ 는 고정자 상전압, $i(t)$ 는 고정자 상전류, R 은 고정자 저항, L 은 권선의 인덕턴스를 나타낸다. $e(t)$ 는 영구자석에 의한 역기전력이다.

$$e(t) = k_e \phi_f w_m \quad (2)$$

여기서 ϕ_f 는 영구자석의 자속이 고정자 권선에 쇄교하는 자속의 크기를 의미한다. k_e 는 역기전력상수이며, w_m 은 회전자의 회전 각속도이다. 전동기의 토크는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다

$$T_e = k_T \phi_f i(t) \quad (3)$$

여기서 k_T 는 토크상수이다. 전동기의 부하구동 시스템 운동방정식은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = J \frac{dw_m}{dt} + Bw_m + T_L \quad (4)$$

여기서 J 는 전동기의 관성 모멘트, B 는 점성 마찰계수, T_L 은 부하토크, w_m 은 전동기의 각속도이다. 식 (1)에서부터 식 (4)까지를 정리하면, 전동기 시스템의 전달 함수는 식 (5)와 같이 정리 할 수 있다.

$$G(s) = \frac{w_m(s)}{v(s)} = \frac{k_T}{(Ls+R)(Js+B) + k_T k_e} - \frac{T_L(Ls+R)}{v(s)[(Ls+R)(Js+B) + k_T k_e]} \quad (5)$$

2. 전동기 시스템의 외란 관측기

외란 관측기를 가장 널리 쓰이는 방법으로 입력 $v(t)$ 에 서부터 출력 w_m 까지의 전동기 시스템을 기반으로 알고리즘을 구현한다. 그림 1과 같은 일반적인 외란 관측기를 정리하면 식 (6)과 같다.

$$\hat{d} = Q(s) [G_M^{-1}(s)w(s) - v(s)] \quad (6)$$

여기서 G_M 은 외란이 없는 상황에서의 전동기 시스템의 전달함수이다.

$$G_M = \frac{w_m(s)}{v(s)} = \frac{k_T}{(Ls+R)(Js+B) + k_T k_e} \quad (7)$$

식 (6)에 식 (7)을 대입하여 정리하면 식 (8)과 같은 결과가 도출된다.

$$\begin{aligned} \hat{d} &= Q(s) [G_M^{-1}(s)G(s)v(s) - v(s)] \\ &= Q(s) \left[1 + \frac{(Ls+R)(Js+B) + k_T k_e}{k_T} \frac{T_L}{v(s)} \right. \\ &\quad \left. \frac{Ls+R}{[(Ls+R)(Js+B) + k_T k_e]} v(s) - v(s) \right] \end{aligned}$$

$$= Q(s) \frac{Ls+R}{k_T} T_L \quad (8)$$

일반적인 외란 관측기는 $\hat{d} = T_L$ 을 만족시키지 못하며, 식 (8)과 같이 외란이 적용되는 시점은 알 수 있지만 정확한 크기를 구하기에는 한계가 있다. 이는 외란을 추정하기 보다는 외란 제거를 위한 제어를 설계할 때 효과가 뛰어난 알고리즘이다. 하지만 결과적으로 외란의 경향성은 파악할 수 있지만 정확한 외란의 크기를 알 수 없으므로 그림 1과 같이 계수 a_s 를 통해 외란의 크기를 보상해 주어야 한다. 즉, 실제 외란의 크기를 알 수 있을 때는 실험적으로 a_s 를 구해 외란 관측기를 사용할 수 있지만 실제 외란의 크기를 실험적으로 측정할 수 없을 때는 정확한 외란의 크

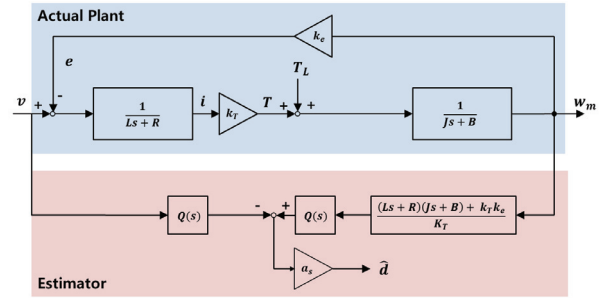


그림 1. 일반적인 외란 관측기의 블록선도.

Fig. 1. Block diagram of the generalized disturbance observer.

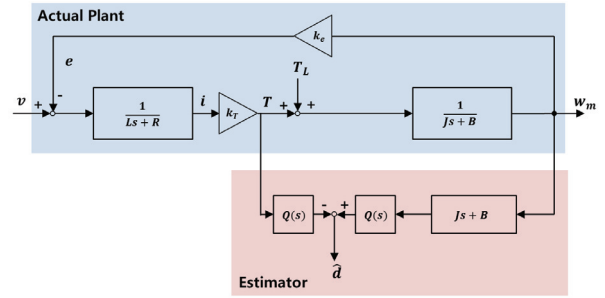


그림 2. 전류 센서를 사용한 외란 관측기의 블록선도.

Fig. 2. Block diagram of the disturbance observer using current sensor.

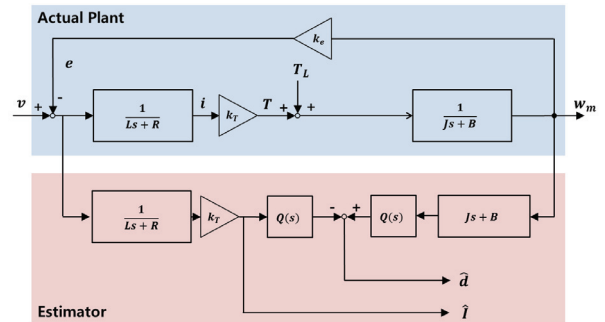


그림 3. 전류 센서를 사용하지 않는 외란 전류 관측기의 블록선도.

Fig. 3. Block diagram of the DCOB without current sensor.

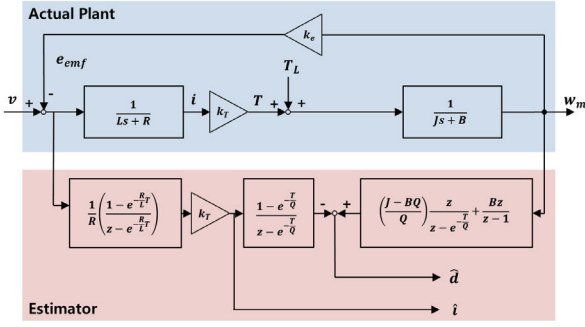


그림 4. 알고리즘 구현을 위한 외란 전류 관측기의 블록선도.
Fig. 4. Block diagram of the DCOB for algorithm implementation.

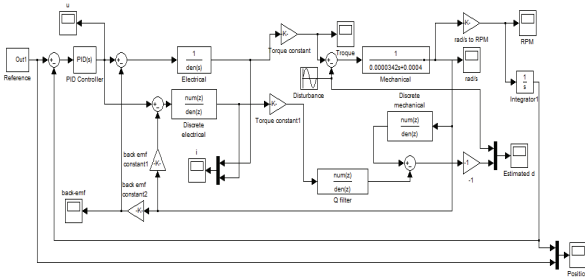


그림 5. SIMULINK를 이용한 외란 전류 관측기의 시뮬레이션.
Fig. 5. Simulation of DCOB by SIMULINK.

기는 알 수 없고 경향성만 파악할 수 있다.

그림 2와 같이 외란 관측기를 전동기의 부하 구동부에 구현함으로써, 전동기의 전류량과 회전 각속도의 정보를 통해 부하 토크를 직접적으로 추정할 수 있다. 전류 센서를 이용한 외란 관측기는 그림 2의 블록선도에 의해 식 (9)와 같이 정리된다. 식 (9)의 $\hat{d} = T_L$ 라는 결과를 통해 외란 토크의 크기와 시점을 모두 알 수 있다.

$$\hat{d} = Q(s) [(Js + B)w(s) - T] = T_L \quad (9)$$

전류 센서를 이용한 외란 관측기를 개선하여 전류 센서 없이 외란 토크를 직접적으로 추정하면서 전동기의 전류 추정도 가능하다. 그림 3과 같이 제어기의 입력 $v(t)$ 와 전동기의 회전 각속도 w_m 의 정보를 통해 전동기의 부하토크와 전류를 추정할 수 있다.

III. 시뮬레이션

외란 전류 관측기(disturbance and current observer)를 실질적으로 구현하기 위해서는 그림 4와 같은 블록선도를 알고리즘화 시키는 과정이 필요하다. 그림 4는 각 전달함수를 0차 홀드(zero-order hold)를 통해 이산화 함수를 생성한 블록선도이다. 전동기의 방정식을 이산화하여 표현하면 식 (9)와 같다.

$$G_E = \frac{1}{R} \begin{pmatrix} 1 - e^{-\frac{R}{L}T} & \\ & -\frac{R}{L}T \end{pmatrix} \quad (9)$$

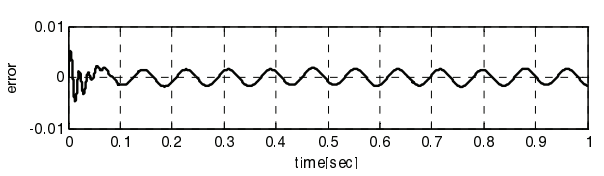
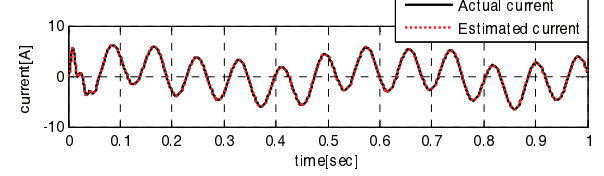
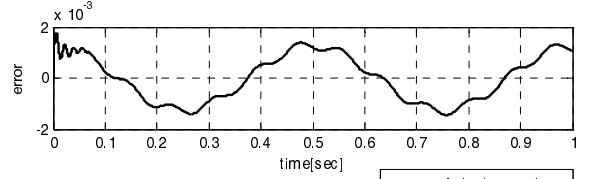
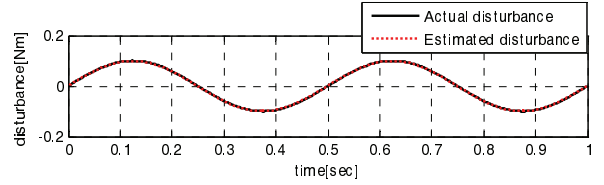


그림 6. SIMULINK를 이용한 외란 전류 관측기의 시뮬레이션.
Fig. 6. Simulation of DCOB by SIMULINK.

표 1. 외란 전류 관측기의 성능 실험을 위한 전동기 사양.
Table 1. Specification of BLDC motor for performance verification in disturbance and current observer.

| EC-4pole 30, 200W | |
|-------------------|------------|
| 정격 전압 | 24 V |
| 정격 전류 | 9.08 A |
| 정격 RPM | 16200 RPM |
| 정격 토크 | 112 mNm |
| 토크 상수 | 13.5 mNm/A |
| 최대 효율 | 88 % |

Q-필터를 1로 설정하면 $\hat{d} = T_L$ 를 만족시키지만 $[Js + B]$ 가 unrealizable 시스템이 된다. 따라서 Q-필터는 $Q(s)[Js + B]$ 를 realizable 시스템으로 구현하기 위해 저역통과 필터 형태로 제안되었으며[11], 플랜트의 Q-필터를 이산화시키면 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q(z) = \frac{1 - e^{-\frac{T}{Q}}}{z - e^{-\frac{T}{Q}}} \quad (10)$$

전동기의 부하 구동부의 역함수와 Q-필터를 함께 표현하면 식 (11)과 같이 표현할 수 있다.

$$G_D = \left(\frac{J - BQ}{Q} \right) \left(\frac{z}{z - e^{-T/Q}} + \frac{Bz}{z - 1} \right) \quad (11)$$

식 (9)를 활용하여 전류 센서 없이 전동기의 전류를 추정할 수 있으며, 식 (9), (10), (11)을 활용하여 전동기에 유입되는 외란에 대해 추정할 수 있다. 식 (9), (10), (11)을 그림 5와

같이 SIMULINK를 통해 시뮬레이션을 수행 하였다. 전동기의 모델링은 표 1의 사양에 맞게 설정하였다. 또한 샘플링 주기는 1 ms로 설정하였다. PID 제어를 통해 기준값을 추종하는 시뮬레이션을 구성하고, 임의의 외란을 입력해 준다. 그림 6은 외란 전류관측기의 시뮬레이션 결과이며, 외란과 전류의 실제 값을 추정하는 결과를 나타낸다.

IV. 실험 결과

1. 실험 구성

외란 전류 관측기의 성능 검증을 위해서 변수를 알고 있는 부하를 주는 구동기와 부하를 받는 구동기를 동기화시킨다. 부하를 받는 구동기는 PID 제어를 통해 기준값을 추종하는 시스템을 구성한다. 부하를 주는 구동기는 계단 응답의 외란을 가진하고, 외란 전류 관측기를 통해 실제 외란과 추정외란, 실제 전류와 추정 전류를 비교할 수 있게 구성하였다. 그림 7은 외란 전류 관측기를 검증하기 위한 실험 장치 구성이다.

Q-필터는 저역 필터(low pass filter) 형태를 활용했으며 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

- 1) Q-필터는 항상 안정하다.
- 2) Q-필터의 진폭은 모델 불확도의 상한영역의 역수 보다 작아야 한다.

식 (12)는 실험적으로 구한 곱셈 불확실성(multiplicative uncertainty)의 상한계계를 모델링한 함수이다. 식 (12)의 결

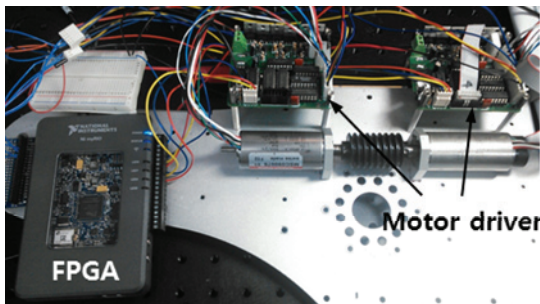


그림 7. 외란 전류 관측기를 검증하기 위한 실험 장치 구성. Fig. 7. Experimental setup for verification of DCOB.

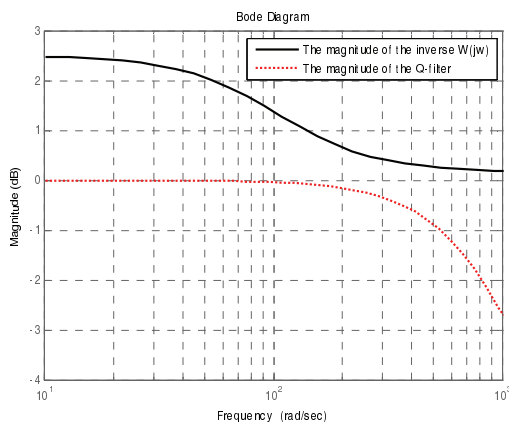


그림 8. $W(jw)$ 의 역함수와 Q-필터의 진폭. Fig. 8. The magnitude of the inverse $W(jw)$ and the Q-filter.

과 및 그림 8을 바탕으로 Q-필터의 진폭이 $W(jw)$ 의 역함수 보다 작은 Q-필터의 차단 주파수는 174Hz로 구현하였다.

$$W(s) = \frac{0.2301s^2 + 50.86s + 2800}{0.2228s^2 + 43.36s + 2100} \quad (12)$$

Q-필터를 이산화시킨 전달함수는 식 (13)과 같이 표현할 수 있다.

$$Q(z) = \frac{0.6321}{z - 0.3679} \quad (13)$$

2. 실험 결과

그림 9는 전동기 전체 시스템에 대해 외란 관측기를 적용했을 때 외란을 추정한 결과이다. 그림 9에서 외란이 작용하는 시점은 파악이 되지만 진폭을 정확히 알 수 없기

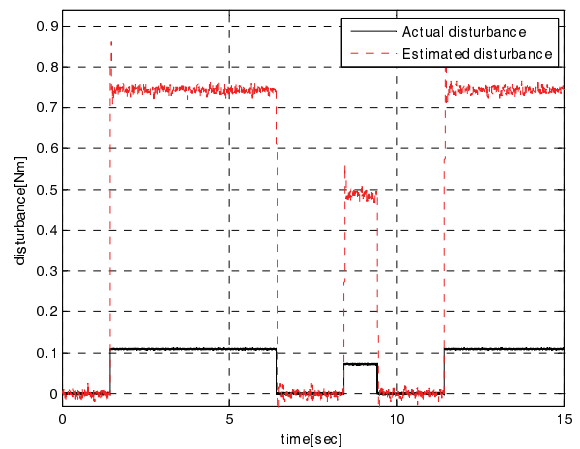


그림 9. 실제외란과 일반적인 외란 관측기를 사용한 추정외란. Fig. 9. Actual disturbance and estimated disturbance using generalized disturbance observer.

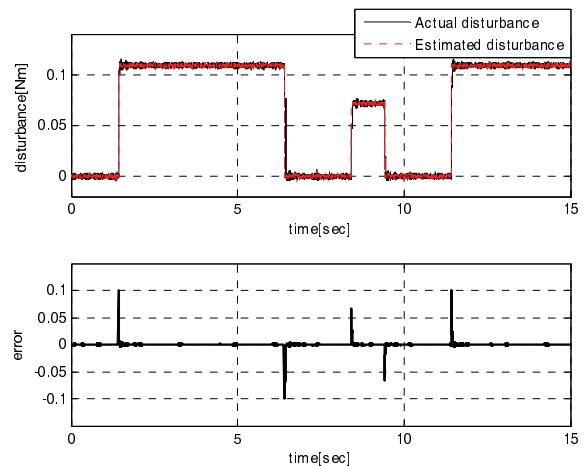


그림 10. 실제외란과 전류 센서를 사용하지 않은 외란 전류 관측기의 추정외란(상), 실제외란과 추정외란의 오차(하).

Fig. 10. Actual disturbance and estimated disturbance using DCOB without current sensor(upper), error of actual disturbance and estimated disturbance(lower).

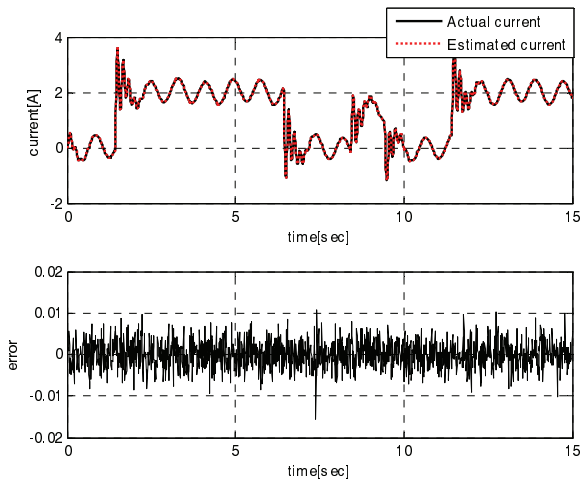


그림 11. 실제 전류와 전류 센서를 사용하지 않은 외란 전류 관측기의 추정전류(상), 실제전류와 추정전류의 오차(하).

Fig. 11. Actual current and estimated current using DCOB without current sensor(upper), error of actual current and estimated current(lower).

때문에 추정된 외란 값의 경향성만을 정보로써 활용하거나, 센서 등으로 실제 외란을 측정 후 실험적인 정보를 토대로 외란 정보가 활용 가능하다. 그림 10은 외란 전류 관측기를 통해 외란을 추정 한 결과이다. 이때, 외란 전류 관측기는 일반적인 외란 관측기에 비해 외란의 실제 측정값과 크기 및 경향성을 잘 추정한다. 여기서 외란의 실제 값은 동기화된 구동기의 전류 값과 토크상수의 곱으로 계산하여 비교하였다. 15초의 실험동안 실제 측정값과의 오차는 RMS (Root Mean Square)를 통해 0.0038으로 확인되었다. 또한 그림 11은 제안한 외란 전류 관측기를 통해 전류를 추정한 것이다. 동일 시간 동안 실제 측정값과의 오차는 RMS를 통해 0.00324로 확인되었다.

V. 결론

본 논문에서는 전동기 시스템에서 외란 및 부하 토크를 추정하는 경우, 전류 센서 없이도 전동기 시스템의 외란 및 전류를 추정이 가능한 외란전류관측기를 설계하였다. 외란 전류관측기와 비교하여, 일반적인 외란 관측기에서 외란의 정확한 크기 추정의 한계를 수식적으로 검증하였고, 제안한 외란 전류 관측기를 통해 전류 센서 없이 외란과 전류 모두 추정이 가능함을 실험 결과를 통해 검증하였다. 외란 크기를 정확하게 측정함으로써 실제 측정량과 비교하여 추정 값을 스케일링하는 과정을 생략할 수 있다. 또한 전류 센서 없이 전류를 추정할 수 있기 때문에 비용 절감 및 시스템의 크기 감소에도 기여한다. 향후 시스템의 노이즈를 고려한 알고리즘으로 정확한 물리량의 추정이 필요할 것으로 보인다.

REFERENCES

[1] Ohnishi, Kouhei, "A new servo method in mecha-

tronics," *Trans. of Japanese Society of Electrical Engineers (in Japanese)*, vol. 107-D, pp. 83-86, 1987.

[2] Takuya Koyanagi, Shigeki Inatama, Sehoon Oh, and Yoichi Hori, "Robust and Safe Control Based on Disturbance Observer for Train Doors," *In Industrial Electronics (ISIE), 2010 IEEE International Symposium on*, pp. 3571-3576, Jul. 2010.

[3] Jungsu Choi, Byeonghun Na, Sehoon Oh, and Kyoungchul Kong, "Robust Position Tracking Control and Ground Contact Detection of Cheetaroid-I Leg by a Disturbance Observer," *The international Federation on Automatic Control*, pp. 7246-7251, Aug. 2014.

[4] Y.-G. Bae and S. Jung, "A compensation method of an accelerometer for an acceleration-based disturbance observer control of a robot manipulator," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 20, no. 6, pp. 651-656, Jun. 2014.

[5] Y.-G. Bae and S. Jung, "Compensation for Position control of a robot manipulator using a modified disturbance observer (DOB) based on an accelerometer," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 19, no. 5, pp. 462-467, May 2013.

[6] Rakan C. Chabaan, "Torque estimation in electrical power steering systems," *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference VPPC'09*, pp. 790-797, 2009.

[7] Ljung, Lennart, *System identification*, Birkhäuser Boston, 1998.

[8] Satoshi Komada, Muneaki Ishida, Kouhei Ohnishi, and Takamasa Hori, "Disturbance Observer-based Motion Control of Direct Drive Motors," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 6, no. 3, pp. 553-559, Sep. 1991.

[9] A.M. Harsha S. Abeykoon and Hasala R. Senevirathne, "Disturbance Observer Based Current Controller for a Brushed DC Motor," *Information and Automation for Sustainability (ICIAfS), 2012 IEEE 6th International Conference on*, Jan. 2012.

[10] Krishnan, Ramu, *Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control*, Prentice Hall, New Jersey, 2001.

[11] Takaji Umeno and Yoichi Hori, "Robust speed control of dc servomotors using modern two degrees-of-freedom controller design," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 38, no. 5, pp. 363-368, Oct. 1991.

이 명 석

2014년 서강대학교 기계공학과 졸업.
2014년~현재 서강대학교 석사 재학 중. 관심분야는 BLDC 전동기 제어 및 전동기 드라이버 설계.



**정 경 모**

2006년 고려대학교 기계공학과 졸업.
2013년 동 대학원 석박통합. 2013년~
현재 현대자동차 중앙연구소 인간편의
연구팀 책임연구원. 관심분야는 입는
로봇 및 이동로봇, 센서퓨전.

**공 경 철**

2004년 서강대학교 기계공학과 졸업.
2006년 동 대학원 석사. 2009년
University of California, Berkeley 박사.
2011년~현재 서강대학교 기계공학과
교수. 관심분야는 이동로봇 및 메카트
로닉스 시스템의 설계, 모델링, 제어.