

외란 관측기 기반의 BLDC 전동기 추종제어

전용호* · 이신원**

Tracking Control of BLDC Motor Based on Disturbance Observer

Yong-Ho Jeon* · Shin-Won Lee**

요약

전동기의 수학적 모델 오차와 작용하는 외란을 고려하여 제어기를 설계하는 것이 강건하며 정밀한 제어 성능을 좌우한다. 강건하며 정밀한 제어를 위하여 기계적인 부분과 전기적인 부분의 외란 관측기를 설계하여 외란을 추정하고, 공칭 시스템으로 설계된 속도제어기와 전류 제어기에 나누어 적용하였다. 설계된 시스템의 제어 성능을 확인하고자 120 [W]급의 BLDC 전동기에 적용하여, 속도 추종제어의 결과 외란을 극복하고 정상상태 오차가 영으로 수렴하며, 접근적 안정한 결과를 확인할 수 있다.

ABSTRACT

When designing a controller, a motor can have robust and precise control performance only by considering the error of the motor's mathematical model and the disturbance acting on it. For robust and precise control, the mechanical and electrical disturbance observers were designed to estimate the disturbance, and applied to the speed controller and current controller designed as a nominal system. To confirm the control performance of the designed system, it is applied to a 120 [W] class BLDC motor, and the result of the speed tracking control overcomes disturbances, the steady state error converges to zero, and the asymptotically stable result can be confirmed.

키워드

BLDC Motor, Disturbance Observer, Speed Control, Current Control, Back-Stepping Control
BLDC 전동기, 외란 관측기, 속도 제어, 전류 제어, 백스텝핑 제어

1. 서론

BLDC 전동기는 제어기를 구성하기 위해서는 기계적인 파라메타, 전기적인 파라메타, 부하의 모델 등의 정확한 수학적 모델이 필요로 하지만 실체는 비선형적인 요소와 모델의 오차가 존재하며 부하의 변동, 외란 등이 존재하여 이를 극복하여 고성능의 제어기를 구성하기 위해서는 많은 연구가 요구된다. 전동기

에 작용하는 부하변동에 대해 추정하고 모델 오차까지도 고려할 수 있는 외란 관측기는 전동기 제어를 위해서는 필수적이다.

외란 관측기는 선형시스템의 주파수 영역에서 해석으로 시작되어 비선형을 포함하여 상태공간에서 해석과 설계 등에 관한 연구로 확대되어 현재 활발하게 연구되고 있다[1-3].

BLDC 전동기는 전기적인 발생 토크를 입력으로

*충원대학교 항공정비학과 교수(waterjliar@jwu.ac.kr)

** 교신저자 : 충원대학교 컴퓨터공학과

· 접수일 : 2020. 08. 28

· 수정완료일 : 2020. 09. 21

· 게재확정일 : 2020. 10. 15

· Received : Aug. 28, 2020, Revised : Sep. 21, 2020, Accepted : Oct. 15, 2020

· Corresponding Author : Shin-Won Lee

Dept. computer engineering, Jungwon University,

Email : swlee@jwu.ac.kr

하고 회전축의 속도를 출력으로 하는 기계적인 시스템과 인버터에 공급되는 전압을 입력으로 하여 고정자 권선에 흐르는 전류를 출력으로 하는 전기적인 시스템이 공존한다[4-10]. 이는 연립 일차 미분방정식을 갖는 2입력 2출력 시스템이 된다. 기계적인 시스템에는 선형적이지만 기계적인 파라메타 오차와 부하변동 외란으로 간주하고, 전기적인 시스템에서는 내부의 영구자석이 회전함으로써 고정자 권선에 발생하는 역기전압을 외란으로 고려할 수 있다. 다중입출력 시스템으로 해석과 설계가 가능하지만 기계적인 시상수와 전기적인 시상수의 차이가 크며 제어기 구성과 관측기의 설계가 복잡하고 어려워지므로 외란 관측기를 간편히 적용할 수 있도록 두 시스템을 나누어 설계한 것을 제안한다.

본 논문은 BLDC 전동기의 강건한 속도와 전류제어기를 구성하기 위하여 3장에서 외란 관측기를 설계한다. 외란 관측기는 두 공칭 시스템에 맞춰 1차로 설계하였다[1-3]. 4장에서는 공칭 시스템에 대하여 속도와 전류 제어기를 백스텝핑 기법으로 설계하기 위해 각각 평가함수를 선정하고 시스템이 점근적 안정함을 얻을 수 있도록 하였다. 그리고 외란에 대한 강건함과 정밀한 추종 성능을 얻고자 설계된 제어기에 추정된 외란을 적용하였다. 5장에서는 추정된 외란의 영향을 120W급 BLDC 전동기에 적용하여 시뮬레이션하였고, 제안된 외란 관측기와 제어기가 유용함을 확인하였다.

II. BLDC 전동기 시스템

BLDC 전동기 시스템의 수학적 모델은 식 (1)에서 식 (3)과 같다[4-6].

$$J_m \dot{w}_r = \tau_e - B_m w_r - \tau_l \quad (1)$$

$$\tau_e = \frac{\sum_{x=a,b,c} E_x \dot{i}_x}{\omega_r} = K_t \dot{i}_x \quad (2)$$

$$L_s \dot{i}_x = U_x - R_s i_x - E_x \quad x = a, b, c \quad (3)$$

여기서, w_r 은 회전자 축의 각속도, τ_l 은 부하토크, J_m 은 전동기 회전자의 관성모멘트, B_m 은 전동기 회전자의 점성 마찰계수, τ_e 는 전자기적으로 발생하는 토크, E_x 는 각 상의 역기전압, i_x 는 각 상의 전류, R_s

는 고정자의 상 저항, L_s 는 각 상의 인덕턴스, U_x 는 각 상의 입력전압이다. 상수 K_t 는 단위 상 전류에 대해 전기적으로 발생 토크로 고정자를 3상 2여자 방식으로 구동함으로써 식 (2)의 오른쪽 항과 같이 간단히 표현될 수 있다.

전동기의 외란 관측기를 간편하게 설계하기 위하여 기계적인 부분과 전기적인 역학방정식으로 나누고, 식 (1)의 전동기 기계적인 부분은 그림 1과 같다.

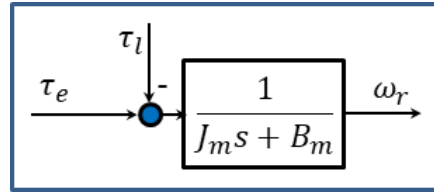


그림 1. BLDCM의 기계부
Fig. 1 The mechanical part of the BLDCM

그림 1은 부하토크 τ_l 이 전동기 회전축에 작용함을 가정한 것으로 입력은 식 (2)이며 출력은 회전축의 각속도이다. 전기적인 역학방정식 식 (3)을 나타낸 것은 그림 2와 같다.

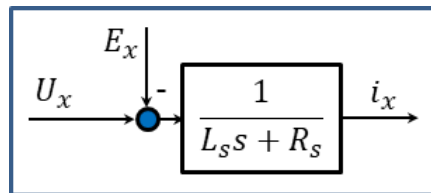


그림 2. BLDCM의 전기부
Fig. 2 The electrical part of the BLDCM

영구자석의 회전으로 고정자 코일의 한 상에 발생하는 역기전압 E_x 는 회전자의 전기 각속도에 비례하고 사다리꼴 모양을 갖는다. 그림 2의 입력 U_x 는 삼상 인버터에 공급되는 전압이며, 출력 i_x 는 고정자 코일에 흐르는 상 전류이다.

III. 외란 관측기 설계

전동기 시스템의 기계적인 부분과 전기적인 부분으로 나누어 외란 관측기를 설계한다.

3.1 기계적인 시스템의 외란 관측기

외란 관측기를 설계하기 위하여 식 (1)의 방정식의 공칭 시스템은 식 (4)에서 식 (5)와 같다.

$$\dot{\omega}_r = -\overline{a}_m \omega_r + \overline{b}_m i_c \quad (4)$$

$$y_m = \omega_r \quad (5)$$

식 (1)과 식 (2)를 이용하여 입력을 상전류 i_c 로 하고 부하 토크는 제거하고 출력은 전동기의 각속도이다. 그리고 $\overline{a}_m = B_m/J_m$ 이며, $\overline{b}_m = K_t/J_m$ 인 공칭값으로 정의한다.

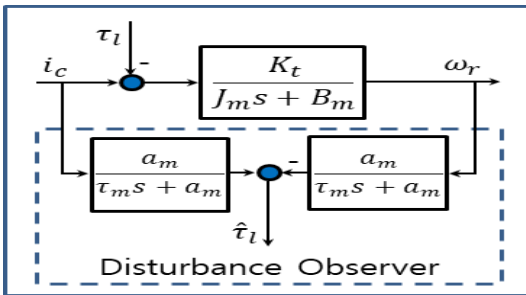


그림 3. 기계부의 외란 관측기

Fig. 3 The disturbance observer of mechanical part

식 (4)에서 식 (5)의 공칭시스템을 기반으로 주파수 영역에서 외란 관측기를 설계한 것이 그림 3이다. 주파수 영역에서 설계된 관측기를 상태방정식으로 표현하면 식 (6)에서 식 (7)와 같다[1-3].

$$\dot{q}_m = -\frac{a_m}{\tau_m} q_m + \frac{a_m}{\tau_m} y_m \quad (6)$$

$$\dot{p}_m = -\frac{a_m}{\tau_m} p_m + \frac{a_m}{\tau_m} u_m \quad (7)$$

식 (6)은 각속도 출력을 입력으로 하여 기계방정식에 입력되는 제어입력과 외란이 합쳐진 값을 추정하도록 계수를 설정하고, 식 (7)은 외란이 포함되지 않은 제어입력을 추정하는 것이다. 두 개의 상태출력의 차이가 외란 추정치로 식 (8)과 같다.

$$\hat{\tau}_l = p_m - q_m \quad (8)$$

외란에 대한 추정치를 제어기의 입력 구성에 포함함으로써 외란의 영향을 줄이거나 제거하여 강건한 속도 추종의 제어 성능을 얻을 수 있다.

3.2 전기적인 시스템의 외란 관측기

외란 관측기를 설계하기 위하여 식 (3)의 방정식의 공칭 시스템은 식 (9)에서 식 (10)과 같다.

$$\dot{i}_x = -\overline{a}_e i_x + \overline{b}_e U_x \quad (9)$$

$$y_e = i_x \quad (10)$$

식 (3)을 이용하여 인버터의 전압을 입력으로 하고 발생하는 역기전압을 제거하여 상전류를 출력으로 하였다. $\overline{a}_e = R_s/L_s$, $\overline{b}_e = 1/L_s$ 인 공칭값이다.

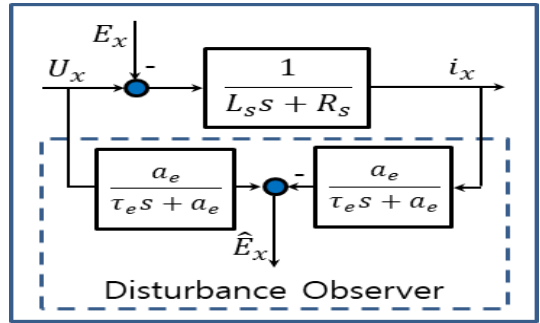


그림 4. 전기부의 외란 관측기

Fig. 4 The disturbance observer of electrical part

식 (9)와 식 (10)의 공칭 시스템을 기반으로 주파수 영역에서 외란 관측기를 설계한 것이 그림 4이다. 주파수 영역에서 설계된 관측기를 상태방정식으로 표현하면 식 (11)에서 식 (12)와 같다[1-3].

$$\dot{q}_e = -\frac{a_e}{\tau_e} q_e + \frac{a_e}{\tau_e} y_e \quad (11)$$

$$\dot{p}_e = -\frac{a_e}{\tau_e} p_e + \frac{a_e}{\tau_e} u_e \quad (12)$$

식 (11)은 상전류를 입력으로 하여 전기 시스템에 입력되는 제어입력과 외란의 합쳐진 값을 추정하도록 설정하고, 식 (12)는 외란이 포함되지 않은 제어입력을 추정하는 것이다. 두 개의 상태 출력의 차이가 외란 추정치로 식 (13)과 같다.

$$\hat{E}_x = p_e - q_e \quad (13)$$

외란에 대한 추정치를 제어기의 입력 구성에 포함함으로써 외란의 영향을 줄이거나 제거하여 강건한 전류의 추종 성능을 얻을 수 있다.

IV. 속도 및 전류 제어기

전동기의 제어기는 기계적인 공칭 시스템의 시상수가 전기적인 공칭 시스템의 시상수에 비해 큰 값을 가지고 있다. 전류제어의 주기를 속도 제어의 주기보다 작게 설정하여 전류제어가 내부 피드백 루프를 구성하고, 속도 제어가 바깥 피드백 루프를 구성하게 제어를 설계한다. 속도 레퍼런스를 입력으로 하는 속도 제어기의 출력을 전류 레퍼런스로 변환하여 전류 제어기의 입력으로 하여 전류제어가 수행된다.

4.1 속도 제어기

전동기의 공칭시스템 식 (4)에서 각속도 오차와 평가함수는 식 (14)와 식 (15)로 정의된다.

$$e_\omega = \omega_{ref} - \omega_r \quad (14)$$

$$V_\omega = \frac{1}{2}e_\omega^2 \quad (15)$$

여기서, ω_{ref} 는 속도 레퍼런스이고, 평가함수는 속도 오차의 제곱으로 항상 양의 값을 가진다. 평가함수의 시간에 대한 변화율이 음이 되도록 제어입력을 설계하면 식 (16)과 같다.

$$i_c = \frac{1}{b_m} (\overline{a_m} \omega_r + \dot{\omega}_{ref} + k_\omega e_\omega) \quad (16)$$

여기서 k_ω 는 양의 값을 선정한다. 식 (16)은 공칭 시스템에 대해 설계된 제어기이고, 식 (8)로 추정된 외란을 적용한 전류 레퍼런스는 식 (17)이 된다.

$$i_{ref} = \frac{1}{b_m} (\overline{a_m} \omega_r + \dot{\omega}_{ref} + k_\omega e_\omega) + \hat{\tau}_l \quad (17)$$

식 (17)은 전류 제어기와 식 (7)의 입력으로 사용된다.

4.2 전류 제어기

전동기 공칭 시스템 식 (9)에 대하여 전류 레퍼런스에 대한 오차와 평가함수는 식 (18)과 식 (19)로 정의한다.

$$e_i = i_{ref} - i_x \quad (18)$$

$$V_i = \frac{1}{2}e_i^2 \quad (19)$$

i_{ref} 는 식 (17)로 만들어지는 전류 레퍼런스이다. 식

(19)의 시간에 대한 변화율이 음이 되게 하는 제어기를 설계하면 식 (20)과 같다.

$$u_c = \frac{1}{b_e} (\overline{a_e} i_x + \dot{i}_{ref} + k_i e_i) \quad (20)$$

여기서 k_i 는 양의 값을 선정한다. 식 (20)은 공칭 시스템에 대해 설계된 제어기이고, 식 (13)의 추정된 외란을 적용한 입력은 식 (21)과 같다.

$$U_x = \frac{1}{b_e} (\overline{a_e} i_x + \dot{i}_{ref} + k_i e_i) + \hat{E}_x \quad (21)$$

식 (21)은 인버터의 제어전압이 되고, 식 (12)의 입력으로 사용된다.

V. 시뮬레이션

설계된 제어기와 외란 관측기의 성능을 검증하고자 Psim을 사용하여 시뮬레이션 수행을 하였으며, BLDC 전동기의 사양은 표 1과 같다.

표 1. BLDC 전동기 파라메타
Table 1. BLDC Motor Parameter

Motor Rated Power	3-phase 120W
Motor Rated Speed	5000 RPM
Pole Number (p)	4
Stator Resistance, R_s	0.215 Ω
Stator Inductance, L_s	0.0000366 mH
Moment of Inertia, J_m	0.0000085 Kgm ²
Friction coefficient, B_m	0.00010625Nm/rad/s
back EMF constant, K_e	0.00234 V/rad/s
Torque Constant, K_t	0.0215 Nm/A

외란 추정을 위한 관측기 이득은 표 2와 같다.

표 2. 외란 관측기 이득
Table 2. Disturbance Observer's gain

$\hat{\tau}_l$		\hat{E}_x	
τ_m	0.1	τ_e	0.1
a_m	12.5	a_e	600

외란 관측기의 이득은 공칭 시스템의 대역폭보다 10배 넓게 설정하였다. 관측기의 효과를 확인하고자 부하 추정 없이 운전한 결과는 그림 5와 같다.

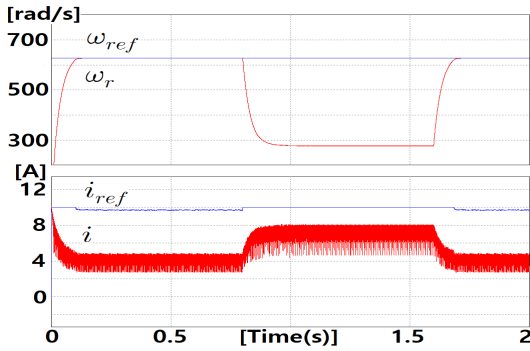


그림 5. 외란 $\hat{\tau}_l$ 이 없는 속도 제어 결과
 Fig. 5 The speed control result without $\hat{\tau}_l$

속도 레퍼런스 ω_{ref} 는 628 [rad/s]이고, 속도 제어이득 k_ω 는 150으로 하였다. 그리고 시간 0.8초에 상수 부하 0.1 [Nm]를 작용하고 1.6초에서 제거하였다. 외란이 작용할 때 속도 제어이득으로는 정밀한 제어가 어려움을 확인하였다.

외란 \hat{E}_x 없이 운전 결과는 그림 6과 같다.

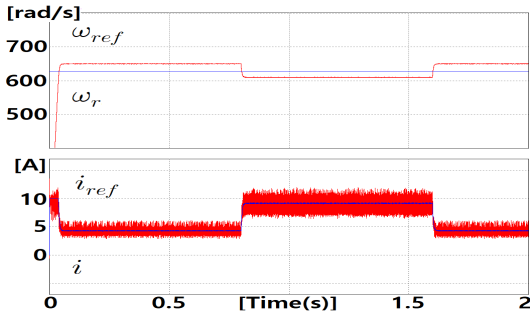


그림 6. 외란 \hat{E}_x 이 없는 속도 제어 결과
 Fig. 6 The speed control result without \hat{E}_x

속도 레퍼런스는 628 [rad/s]이고, 속도 제어이득은 15로 하고, 전류제어 이득 k_i 을 30000으로 하고 그림 5의 동일한 부하를 작용하였다. 전류의 추종은 정밀하게 이루어지나 속도 제어의 정상상태 오차가 작용하는 것은 전류 레퍼런스가 만들어질 때 외란 \hat{E}_x 가 반영되지 않은 결과로 판단된다.

외란 관측기를 모두 사용하여 얻은 결과는 그림 7과 같다.

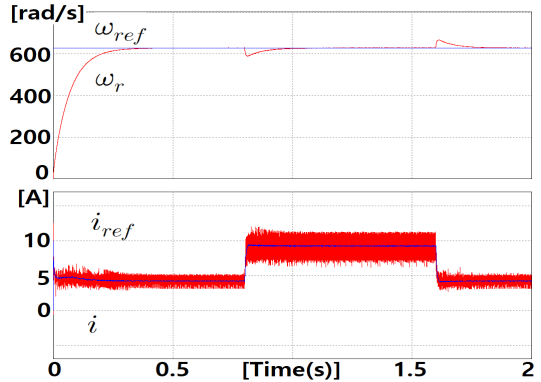


그림 7. 외란 관측기가 포함된 속도제어 결과
 Fig. 7 The speed control result with the DOB

속도 레퍼런스 628 [rad/s]이고, 속도 제어이득 k_ω 는 15으로 하였고, 전류제어 이득 k_i 을 3000으로 이전과 동일한 부하를 작용하였다. 속도의 정상상태 오차가 없으며 시간 0.8초에서 상수 부하 0.1 [Nm]가 작용시 약 30 [rad/s]의 언더슈트가 발생하고 약 0.2 이내에 부하의 영향을 제거되었고, 시간 1.6초에서 부하를 제거한 결과 약 30 [rad/s]의 오버슈트가 발생하지만 0.2 이내 속도 레퍼런스를 추종하였다.

VI. 결 론

전동기는 기계적인 요소와 전기적인 요소가 결합된 특징을 가지고 있어서 강건하고 정밀한 전동기 제어를 위해서는 정확한 전동기 파라메타와 기계적인 부분에 작용하는 외란과 전기적인 부분에서 작용하는 외란으로 나누어 관측된 외란을 제어기에 반영할 수 있어야 한다. 설계된 관측기에 의해 추정된 외란을 속도 제어 및 전류 제어기에 반영한 결과는 정상 상태 오차가 영으로 수렴하면서 점근적인 안정을 얻는 강건하고 정밀한 제어 성능을 얻을 수 있었다. 추후로 관측기의 설계와 필터의 파라메타에 대한 연구와 상태 변수에 노이즈가 포함되는 것의 연구가 되어야 할 것이다.

References

[1] K. Ohnishi, "A new servo method in mechatronics," *Trans. of Japanese Society of Electrical Engineers*, vol. 107-D, 1987, pp. 83-86.

[2] J. Back and H. Shim, "Adding robustness to nominal output feedback controllers for uncertain nonlinear systems: A nonlinear version of disturbance observer," *Automatica*, vol. 44, no. 10, 2008, pp. 2528-2537.

[3] J. Back and H. Shim, "An inner-loop controller guaranteeing robust transient performance for uncertain MIMO nonlinear systems," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 54, no. 7, 2009, pp. 1601-1607.

[4] J. Kim, "A robust sensorless speed control of sensorless BLDC motor," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 3, no. 4, 2008, pp. 266-275.

[5] H. Lee, W. Cho, and K. Lee, "Improved switching method for sensorless BLDC motor drive," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 5, no. 2, 2010, pp. 164-170.

[6] Y-H. Jeon and M-H. Cho, "A Speed Control of BLDC Motor using Adaptive Back stepping Technique," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 9, no. 8, 2014, pp. 899-905.

[7] J. Zhou and Y. Wang, "Adaptive backstepping speed controller design for a permanent magnet synchronous motor," *Electric Power Applications IEE Proc.* vol. 149, no. 2, 2002. pp. 165-172.

[8] M. Ouassaid, M. Cherkaoui, and Y. Zidani, "A Nonlinear Speed Control for a PM Synchronous Motor Using an Adaptive Back-stepping Control Approach," *IEEE Int. Conf. on Industrial Technology (ICIT)*, Hammamet, Tunisia, vol. 3, 2004, pp. 1287-1292.

[9] S. Rebouh, A. Kaddouri, R. Abdessemed, and A. Haddoun, "Adaptive Back stepping speed Control for a Permanent Magnet Synchronous Motor," *Management and Service Science (MASS) 2011 Int. Conf.*, Wuhan, China, 2011, pp. 1-4.

[10] L. Yuan, H. Feng-you, and W. Feng "Nominal Model-Based Control for Permanent

Magnet Synchronous Motor," *2009 Int. Conf. on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*, Hangzhou, China, vol. 2, 2009, pp. 343-346.

[11] S. Back, "A Study on the Design and Implementation of 2-phase BLDC Fan Motor with 1-horsepower Class for Air Conditioning," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 13, no. 4, Aug. 2018, pp. 760.

[12] H. Kwon, "Knee Rehabilitation System through EMG Signal analysis and BLDC Motor Control," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 14, no.5, Oct. 2019, pp. 1009-1018.

저자 소개



전용호(Yong-Ho Jeon)

1996년 광운대학교 제어계측공학과 졸업(공학사)

1998년 광운대학교 대학원 제어계측공학과 졸업(공학석사)

2008년 광운대학교 대학원 정보제어공학과 졸업(공학박사)

2013년 ~2017년 8월 중원대학교 메카트로닉스학과 교수

2017년 9월 ~ 중원대학교 항공정비학과 교수

※ 관심분야 : 가변속 시스템, 지능로봇 시스템



이신원(Shin-Won Lee)

1990년 전북대학교 전산통계학과 졸업(이학사)

1992년 전북대학교 대학원 전산통계학과 졸업(이학석사)

2005년 전북대학교 대학원 전자계산기공학과 졸업(공학박사)

2009년 ~현재 중원대학교 컴퓨터공학과 교수

※ 관심분야 : 제어 시스템, ICT, 인공지능