

논문 2020-57-6-12

BLDC모터 속도응답 특성 개선을 위한 퍼지 PID 제어 알고리즘

(Fuzzy PID Control Algorithm For Improvement Of BLDC Motor
Speed Response Characteristics)

김 태 오*, 한 상 수**

(Tae-Oh Kim and Sang-Soo Han[©])

요 약

오늘날 BLDC모터는 고성능이고 크기가 작은 반면에 토크가 작고 효율이 좋아서 산업용으로 널리 사용되고 있으며 최적의 성능을 얻기 위해 다양한 제어 기법 등이 개발되고 있다. 그러한 BLDC모터를 제어하기 위해 대표적인 PI제어기가 많이 사용되고 있다. 그러나 PI제어는 오버슈트가 크고 속도 변환 시 Settling Time이 길어지는 현상이 발생한다. 이것을 해결하기 위해 PID제어기가 많이 사용되고 있지만 최적화된 이득을 얻기 위해 많은 경험과 노력이 필요하다. 이런 문제를 해결하기 위해 과도응답 상태에서 큰 오버슈트 없이 정상상태까지 도달하는 시간이 짧은 퍼지제어 컨트롤러와 PID 컨트롤러의 조합인 퍼지 PID 제어 알고리즘을 제안한다. 실험결과 속도제어에서 기존 PID 제어보다 0.014초정도 빠르게 정상상태에 도달하였다.

Abstract

While today's BLDC motors are high performance and small in size, they are widely used for industrial use due to their small and efficient torque, and a variety of control techniques are being developed to achieve optimum performance. A typical PI controller is often used to control such BLDC motors. However, PI control has a large overshoot and the setting time is longer when switching speeds. Although many PID controllers are used to address this, it takes a lot of experience and effort to achieve optimized benefits. To address this problem, we propose a fuzzy PID control algorithm, a combination of fuzzy control controllers and PID controllers that have a short time of reaching normal state from transient response state without a large overshoot. The test results showed that speed control reached normal state 0.014 seconds faster than the existing PID control.

Keywords : BLDC Motor, PID controller, Fuzzy PID controller, overshoots, Settling Time

I. 서 론

기존 DC모터는 고정자로 영구자석을 사용하고, 회전자로 코일을 사용하여 구성된 것으로 브러쉬를 사용하기 때문에 회전할수록 브러쉬와 정류자에서 마모, 분진 및 소음이 발생하여 수명에 한계가 발생한다. 반면 BLDC(Brushless DC)모터는 기존의 DC모터에서 브러쉬를 제거한 모터이다. 제어에 대한 넓은 속도 범위와

작은 관성으로 인하여 제어구조가 간단하다는 점은 BLDC모터가 서브모터로서의 최적의 조건을 가지고 있음을 보여주고 있다. 이러한 효율성으로 인해 최근 고성능 BLDC모터가 산업용 및 전기 차량의 가변속 구동 시스템에 널리 사용되고 있으며 최적의 성능을 얻기 위해 다양한 속도제어, 위치제어 기법 등이 개발되고 있다. 여러 제어 방식 중 가장 간단한 구조와 쉬운 적용 때문에 현재까지도 모터제어에 PI제어가 가장 보편화 되어 있다. 그러나 기존 PI제어기를 사용하여 속도 제어를 할 경우 속도와 토크가 정상상태에 도달하기까지의 시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 또한 계수를 직접적으로 사용자가 설정해야 하는 문제점을 가지고 있고 I 계수에 의해 와인드업(Wind up) 현상이 일어난다^[1]. 적분기 포화

* 정회원, 가천대학교 IT융합공학과(Department of IT Convergence Engineering, Gachon University)

** 평생회원, 가천대학교 전기공학과(Department of Electrical Engineering, Gachon University)

© Corresponding Author(E-mail : sshan@gachon.ac.kr)

Received ; March 9, 2020

Revised ; March 26, 2020

Accepted ; April 1, 2020

에 의해 이러한 현상이 발생하면 느린 응답 시간을 가지기 때문에 응답 속도가 지연되어 모터 제어에 큰 어려움이 생긴다. 이러한 문제는 PID제어기를 이용함으로써 해결할 수 있다^[2]. 그러나 PID제어기는 기존의 PI제어기에 비하여 제어기 구조의 복잡성에 의하여 실무자가 제어 대상을 제어하고 운용하기에는 어려움이 있다^[3, 4]. 또한 최적화된 이득을 구하는 데는 많은 노력과 경험이 요구된다. 원하는 출력을 얻기 위해서 시스템의 매개변수를 정확히 산출해 내야하며 부하의 변동이 발생하는 경우에는 그때마다 PID제어기의 매개변수들을 다시 조정해야하는 어려움이 발생한다^[5]. 반면 퍼지 제어이론은 과도응답 상태에서 큰 오버슈트 없이 정상상태까지 도달하는 시간이 짧은 장점과 비선형적 제어와 복잡한 시스템에 제어가 쉽게 가능하다는 장점이 있다. 이에 최근에는 퍼지 알고리즘을 이용하여 PID제어기의 제어 이득을 조정할 수 있는 방법에 대한 연구가 많이 진행되고 있다^[6, 7]. 따라서 본 논문에서는 시비율에 따른 PID 파라미터를 조정하기 위한 퍼지 로직 컨트롤러와 PID 컨트롤러의 조합이 좋은 대안이 될 수 있는 BLDC 모터 속도응답 특성 개선을 위한 퍼지 PID 제어 알고리즘을 제안하였다. 제안한 제어기는 Matlab 2019b의 Simulink 환경을 이용하여 모델링 하였고, 제어 알고리즘의 타당성과 효율성은 시뮬레이션을 통해 입증하였다.

II. BLDC 전동기

그림 1은 3상 BLDC모터의 제어 회로 구조이다.

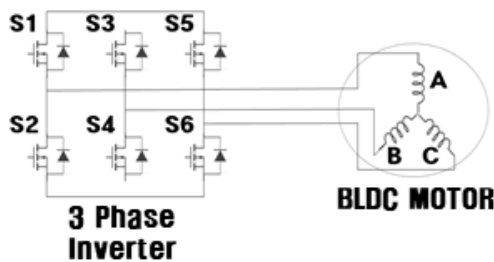


그림 1. BLDC 모터 제어 회로
Fig. 1. BLDC Motor control circuit.

1. BLDC 모터

BLDC 모터는 영구 자석이 위치에 따라서 고정자의 권선에 전류를 흘려준다. 이에 따라 자속을 발생시킬 권선을 순시적으로 바꾸어 영구자석이 회전할 수 있도록 한다. 3상 스위치를 60°의 각도마다 교차하는 동작을 통해 모터 내부에 흐르는 전류의 방향을 제어하여 모터의

회전 방향 및 회전 각도를 결정한다. 그림 1은 BLDC 모터의 구동을 위해서 인버터, 권선 3개, 각 상에 해당하는 권선에 2개의 스위칭 소자가 있고 총 6개로 구성되어있다. S1, S3, S5 스위칭 소자는 각 상에 +방향으로 전류를 흘려주고 S2, S4, S6 스위칭 소자는 각 상에 -방향으로 전류를 흘려준다. BLDC 모터를 효율적으로 구동시키기 위하여 6개의 스위칭 소자 중 항상 2개의 스위칭 소자만 On하여 모터를 구동시킨다. BLDC모터의 등가회로 해석은 각 상의 변수에 대한 식을 이용하여 해석이 가능하다.

2. BLDC 모터 방정식

$$V_a = I_a R_a + L \frac{dI_a}{dt} + EMF_a \quad (1)$$

$$V_b = I_b R_b + L \frac{dI_b}{dt} + EMF_b \quad (2)$$

$$V_c = I_c R_c + L \frac{dI_c}{dt} + EMF_c \quad (3)$$

V 는 각 상의 전압, R 은 각 상의 저항, I 는 각 상의 전류, L 은 각 상의 인덕터, EMF 는 각 상의 역기전력이다.

각 상의 역기전력은 다음 식과 같다.

$$EMF_a = K_e f(\theta_e) w_r \quad (4)$$

$$EMF_b = K_e f(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) w_r \quad (5)$$

$$EMF_c = K_e f(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) w_r \quad (6)$$

K_e 는 역기전력 상수, $f(\theta_e)$ 는 역기전력 기준 함수, w_r 은 각속도, θ_e 는 회전자 위치이다.

모터의 토크는 다음 식과 같다.

$$T_e = (EMF_a I_a + EMF_b I_b + EMF_c I_c) / w_r \quad (7)$$

관성과 속도에 따른 부하는 모터의 특성에 따라서 결정되며, 부하 토크는 외부에서 결정된다.

토크상수와 역기전력 상수가 이상적으로 같은데 이는 다음 식을 통해 알 수 있다.

$$T_e \omega_m = k_T I w_r = k_e \omega_r I \quad (8)$$

기계시스템의 운동방정식은 다음 식을 통해 알 수 있다.

$$J \frac{d\omega_r}{dt} + B \omega_m = (T_e - T_L) \quad (9)$$

J 는 관성모멘트, B 는 댐핑 계수 이다.

III. 퍼지 PID 제어기

1. PID 컨트롤러

PID 컨트롤러는 비례항, 적분항, 미분항을 설계하여 설정 값을 정상상태 오차 값에 맞게 제어 값을 조절함으로써 원하는 출력 값을 출력시키는 제어기이다.

$$k(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s \quad (10)$$

k_p 는 비례항, k_i 는 적분항, k_d 는 미분항이다.

계수값의 동조기법은 Ziegler-Nichols 기법을 사용하였다^[8]. Ziegler-Nichols 기법에 의한 PID 제어 값은 $k_p = 0.8$, $k_i = 48$, $k_d = 0.01$ 이다.

2. 퍼지 PID 컨트롤러

그림 2는 퍼지 PID 제어기 블록도를 나타낸 것이다. 기준 속도와 BLDC 모터에서 측정된 속도를 피드백 받아 연산한 결과 값은 오차 e 가 되고 이 값을 지연 함수($\frac{1}{z}$)를 이용하여 출력으로 나온 값은 Δe 로 이 두 값들은 퍼지 로직 컨트롤러를 거쳐 입력 변수로 퍼지화 후 K_p , K_i , K_d 값으로 PID 제어기에 초기 값으로 입력된다.

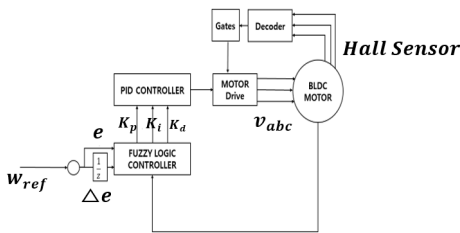


그림 2. 퍼지 PID 제어기 블록도
Fig. 2. Block Diagram of Fuzzy PID Controller.

그림 3은 퍼지 로직 컨트롤러에 대한 입력으로 오차 e 와 Δe 로 두가지가 있다. 각 입력은 $[-3,3]$ 로 정규화 하였으며 퍼지 멤버십 함수를 이용하여 각각 'NB', 'NM', 'NS', 'Z', 'PS', 'PM', 'PB'의 7개로 구성되어 있다.

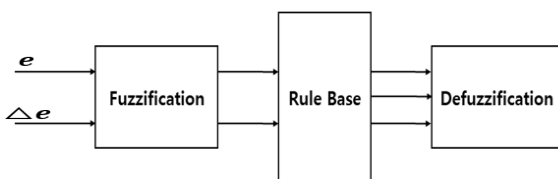


그림 3. 퍼지 로직 컨트롤러 구조
Fig. 3. Fuzzy logic control structure.

입력 변수와 출력 변수에 대한 멤버십 함수의 범위를 그림 4~8에 나타냈다.

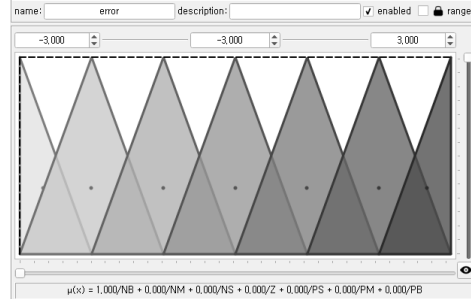


그림 4. 입력 오차 e 에 대한 멤버십 함수
Fig. 4. Membership functions of input speed error.

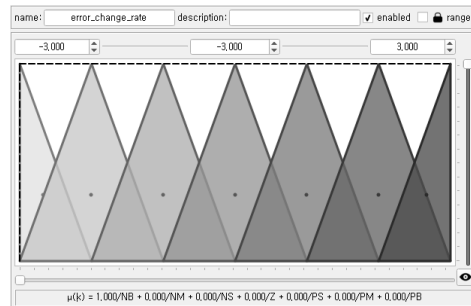


그림 5. 오차 변화율 Δe 에 대한 멤버십 함수
Fig. 5. Membership functions of input speed error rate Δe .

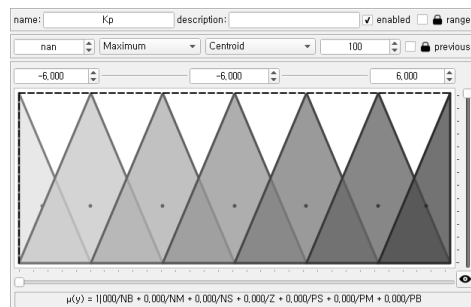


그림 6. 출력 변수 K_p 에 대한 멤버십 함수
Fig. 6. Membership functions of output variable K_p .

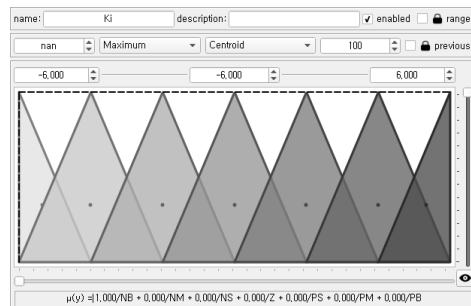


그림 7. 출력 변수 K_i 에 대한 멤버십 함수
Fig. 7. Membership functions of output variable K_i .

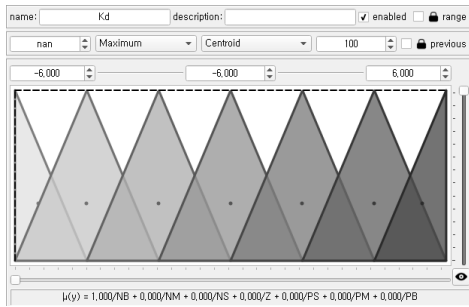


그림 8. 출력 변수 Kd에 대한 멤버십 함수

Fig. 8. Membership functions of output variable Kd.

설정된 입력 변수를 이용하여 퍼지 추론 과정에서의 규칙들을 다음과 같이 설정하였다. 두 입력 조건을 통해 출력 규칙의 조건은 총 49개로 설정하였으며 입력 조건에 따른 출력 값들을 설정하여 멤버십 함수에 맞는 K_p , K_i , K_d 값으로 출력하게 된다.

표 1. 출력 변수 Kp의 멤버십 함수

Table1. Membership function of output variable Kp.

Δe \ e	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	Z
NM	PB	PB	PM	PM	PS	Z	Z
NS	PM	PM	PM	PS	Z	NS	NM
Z	PM	PS	PS	Z	NS	NM	NM
PS	PS	PS	Z	NS	NS	NM	NM
PM	Z	Z	NS	NM	NM	NM	NB
PB	Z	NS	NS	NM	NM	NB	NB

표 2. 출력 변수 Ki의 멤버십 함수

Table2. Membership function of output variable Ki.

Δe \ e	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NM	Z	Z
NM	NB	NB	NM	NM	NS	Z	Z
NS	NM	NM	NS	NS	Z	PS	PS
Z	NM	NS	NS	Z	PS	PS	PM
PS	NS	NS	Z	PS	PS	PM	PM
PM	Z	Z	PS	PM	PM	PB	PB
PB	Z	Z	PS	PM	PB	PB	PB

표 3. 출력 변수 Kd의 멤버십 함수

Table3. Membership function of output variable Kd.

Δe \ e	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PS	PS	Z	Z	Z	PS	PS
NM	NS	NS	NS	NS	Z	NS	PM
NS	NB	NB	NM	NS	Z	PS	PM
Z	NB	NM	NM	NS	Z	PS	PM
PS	NB	NM	NS	NS	Z	PS	PS
PM	NM	NS	NS	NS	Z	PS	PS
PB	PS	Z	Z	Z	Z	PS	PS

표 1~3은 입력과 출력에 대한 멤버십 함수에 대한 규칙 관계이다. 진리표를 바탕으로 총 49개의 퍼지 로직 제어기의 퍼지 룰을 설정하여 입력 변수에 따라 최적의 출력 값을 유지 할 수 있도록 설계하였다.

$$COG = \frac{\int_a^b \mu_A(x) x dx}{\int_a^b \mu_A(x) dx} \quad (10)$$

비퍼지화는 가장 대표적인 무게 중심법을 사용하였다. 일반적으로 무게 중심법은 다른 방법들에 비하여 우수한 경향이 있고 일반적인 PID제어기와 비슷한 특성을 나타낸다^[9].

III. 실험

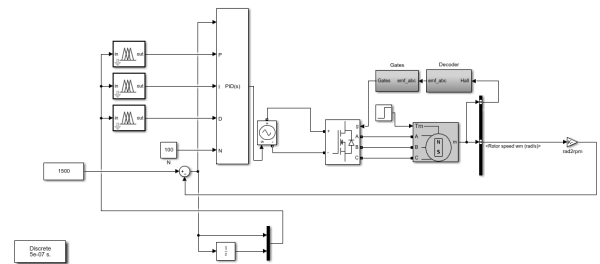


그림 9. 매트랩 구성 회로도

Fig. 9. Matlab Configuration Circuit Diagram.

그림 9는 매트랩을 이용한 퍼지 PID 제어기의 시뮬레이션 회로도이다.

표 4는 BLDC모터의 정격 Parameter를 나타내었다. 기존 PID제어기와 비교하기 위해 모터의 정격은 동일한 조건에서 실험을 진행하였다.

표 4. BLDC 모터의 정격

Table4. Rated BLDC motor.

Parameter	Value
Rated Voltage (V)	160
Rated Speed (rpm)	1500
Poles of the Motor (P)	4
Numver of phases(Φ)	3
Stator Phase Resistance Rs(Ω)	0.7
Stator Phase inductance Ls(H)	$2.72e^{-3}$
Torque Constant(k)	0.84

기준 속도를 1500RPM으로 맞추어 정상상태에 도달하는 응답 시간을 측정하는 실험을 진행하였다.

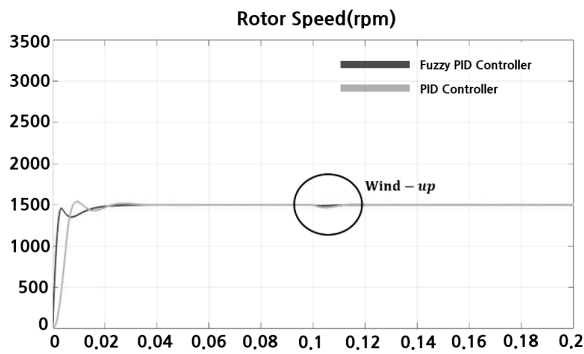


그림 10. 무 부하 1500RPM 속도 측정 결과
Fig. 10. Results of no-load 1500RPM speed measurement.

속도 응답에 대한 실험의 결과는 그림 10과 같다. PID제어기의 경우 1500RPM의 속도로 정상상태에 도달할 때까지 0.037초의 시간이 걸렸으며 퍼지 PID 제어기의 경우 정상상태에 도달할 때까지 0.023초의 시간이 걸렸다. 또한 PID제어기의 경우 0.1초에서 0.11초까지 와인드업 현상이 발생하는 반면 퍼지 PID제어기는 정상상태로 안정적인 속도를 유지한다.

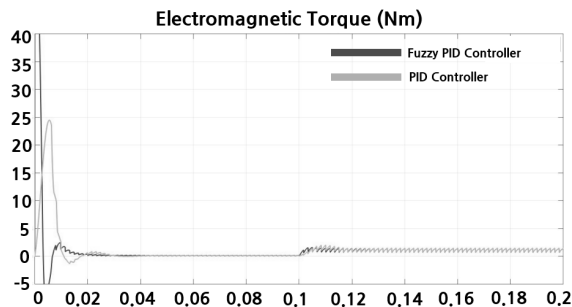


그림 11. 무 부하 1500RPM 토크 측정 결과
Fig. 11. Results of no-load 1500RPM Torque measurement.

토크 영역에 대한 실험의 결과는 그림 11과 같다. PID제어기의 경우 토크응답시간이 0.038초인 반면 퍼지 PID 제어기의 경우 토크응답시간이 0.024초로 퍼지 제어기가 초기 토크 부하를 크게 증가시켜 빠르게 정상상태에 도달하였다.

표 5. 퍼지 PID제어기와 PID제어기 토크, 속도 결과
Table5. Fuzzy PID Controller and PID Controller Torque, Speed result.

		1500RPM
Fuzzy-PID Controller	Speed Response Time	0.023s
	Torque Response Time	0.024s
PID Controller	Speed Response Time	0.037s
	Torque Response Time	0.038s

표 5는 실험에 대한 결과를 표로 정리한 것으로 1500RPM의 실험 결과 속도 영역에서 퍼지 PID 제어기가 PID제어기 보다 0.014초정도 빠르게 정상상태에 도달하였으며, 토크 영역에서 퍼지 PID 제어기가 PID 제어기보다 0.014초정도 빠르게 정상상태에 도달하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 BLDC 모터 속도응답 특성 개선을 위한 퍼지 PID제어 알고리즘을 제안하였다. 시뮬레이션 결과 제안한 퍼지 PID제어기는 Ziegler-Nichols 기법을 이용한 PID제어기보다 무부하시 중고속(1500RPM)에 대한 속도 및 토크 응답 특성이 우수함을 확인하였다. 또한 정상 상태 응답에서 발생하는 Wind up 현상을 크게 줄여줌으로써 시스템의 속도 응답이 안정적임을 알 수 있다.

REFERENCES

- [1] K. S. Walgama, S. Ronnback, and J. Sternby, "Generalisation of conditioning technique for anti-windup compensators", IEEE Proc. Control Theory Appl., Vol. 139, No. 2, 1991, pp. 109-118
- [2] Won-Eel Yun, Jong-Woo Choi, Heung-Geun Kim, "Anti-Windup Strategy of PI Controller without Overshoot", Power Electronics Conference, 2005, pp. 538-541.
- [3] Cho, Hyeon-Seob, "A Study on the Speed Control of Induction Motor using a PID Controller and Neural Network Controller", Korea Academy Industrial Cooperation Society, Vol. 10, No. 8, 2009, p.p 1993-1997
- [4] In Soo Kim, Young Jin Lee, Sung Jun Park, Han Woong Park, Man Hyung Lee, "Robust PID Controller Tuning Technique and Application to Speed Controller Design for BLDC Motors", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 17, No. 8, 2000, p.p 126-133
- [5] Chuen Chien Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems:Fuzzy Logic controller-Part 1", 1990 IEEE
- [6] Hanang, Seung-Bok Choi, Jung Woo Sohn, "Torque Tracking Control of MR Brake Using a Fuzzy-PID Control Algorithm", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 27, No. 4, 2017, pp. 444-450

- [7] T Takagi and M Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control", IEEE. Trans on Systems, Man and Cybernetics. Vol. 15, 1985, pp. 116-132
- [8] Jeoung Nae Choi, Won Hyok Lee, Jin Kwon Kim, Hyung Soo Hwang, "The Fuzzy Ziegler-Nichols Tuning Method for PID Controller", Korean Institute of Intelligent Systems Journal of Academic Presentation papers, Vol. 8, No. 1, 1998, pp. 43-46
- [9] H. B. Kazemian, "Developments of fuzzy PID controllers", Expert Systems, November, Vol. 22, No. 5, 2005, pp. 254-264

 저 자 소 개



김 태 오(정회원)
2016년 청주대학교 전자공학과
학사 졸업.
2018년~현재 가천대학교 IT융합
공학과(석사과정)

<주관심분야: 딥러닝, 빅 데이터, AI, 로봇제어,
지능 및 퍼지제어, 안드로이드>



한 상 수(평생회원)
1985년 명지대학교 대학원 전자공
학과 공학석사 졸업.
1995년 홍익대학교 대학원 전자공
학과 공학박사
1989년~현재 가천대학교 전기공
학과 교수

<주관심분야: 지능 및 퍼지제어, 전력전자제어,
로봇시스템제어, 임베디드하드웨어 설계>